РАСЧЕТ СИЛЫ ПРОТЯГИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ТВЕРДОСПЛАВНОЙ ДЕФОРМИРУЮЩЕЙ ПРОТЯЖКОЙ

« НАУКОВА ДУМКА »

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

РАСЧЕТ СИЛЫ ПРОТЯГИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ТВЕРДОСПЛАВНОЙ ДЕФОРМИРУЮЩЕЙ ПРОТЯЖКОЙ

(Научно – техническая информация)

ИЗДАТЕЛЬСТВО « НАУКОВА ДУМКА »
КИЕВ - 1975

УДК 621.919

Изложены результаты научно-исследовательских работ, выполненных в Институте сверхтвердых материалов АН УССР по изучению силы протягивания цилиндрических отверстий твердосплавными деформирующими протяжками. Показано, как сила протягивания зависит от основных факторов процесса – обрабатываемого металла и его твердости, диаметра отверстия, толщины стенки детали, натяга на деформирующее кольцо, расположения кольца по длине отверстия и др. Приведены формулы для расчета силы протягивания. Предложен метод значительного снижения силы протягивания использованием внеконтактной деформации детали.

А в т о р ы : А.М.РОЗЕНБЕРГ, О.А.РОЗЕНБЕРГ, А.Д.КРИЦКИЙ, Ю.Ф.БУСЕЛ

Редакция информационных изданий

Р 31009 – 590
М221(04)-75

©Институт сверхтвердых материалов АН УССР, 1975 г.

ВВЕДЕНИЕ

Протяжки с твердосплавными деформирующими элементами получают все большее распространение при обработке цилиндрических отверстий в деталях, изготовляемых из различных пластичных металлов и сплавов. Эти детали могут быть корпусными или иметь форму втулок и труб. Твердосплавная деформирующая протяжка (рис. I) состоит из стальной оправки I, на которую одеты твердосплавные деформирующие кольца 2 и дистанционные втулки 3, стянутые гайкой 4. Для протягивания отверстий в корпусных деталях с малыми подходами к отверстиям протяжки снабжаются сменным хвостовиком 5. Использование на протяжках твердосплавных колец вместо стальных повысило их стойкость в сотни раз, позволило освободиться от возникновения схватывания кольца с обрабатываемым металлом, расширило возможности применения в машиностроении метода пластического деформирования для обработки отверстий [I – 4].

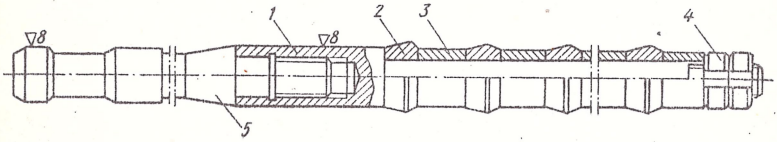

Рис. I. Твердосплавная деформирующая протяжка.

Если ранее эта операция служила в основном для осуществления малых пластических деформаций (поверхностных) и целью ее было выглаживание поверхности отверстия, то в настоящее время она успешно используется в деталях типа втулок и труб при обработке отверстий до деформации I0–20%. Это приводит к увеличению не только диаметра отверстия, но и наружного диаметра детали, т.е. при этом происходит сквозная пластическая деформация стенок детали.

Малые пластические деформации при деформирующем протягивании применяются и в настоящее время в тех случаях, когда необходимо получить вы-

сокую точность и чистоту поверхности обработанного отверстия, а также при обработке отверстий с бесконечной толщиной стенки*.

При крупных деформациях соответственно значительно увеличивают натяги на каждое кольцо протяжки. Они составляют не сотые доли миллиметра, а 0,2–0,5 мм и в ряде случаев равняются 1–2,5 мм на одно кольцо. Естественно, что при больших деформациях и столь крупных натягах на кольцо, силовая нагрузка на протяжке будет очень большой и может достигать нескольких десятков тонн. Например, при протягивании втулки из стали 45 с внутренним диаметром 69 мм и толщиной стенки 8 мм с натягом на кольцо 2,0 мм сила на каждом отдельном кольце протяжки составляет 16 т, а при внутреннем диаметре 104 мм и толщине стенки 11 мм с натягом на кольцо 1,0 мм – 22 т.

В последние годы в Институте сверхтвердых материалов АН УССР разработан метод расчета твердосплавных колец деформирующих протяжек на прочность [5], определена их оптимальная форма с точки зрения несущей способности. Это позволило перейти к обработке отверстий методом больших пластических деформаций твердосплавными протяжками в крупных цилиндрах со значительной толщиной стенки, где нагрузки на кольцо еще более значительные. Так, при протягивании отверстия диаметром 150 мм в цилиндре с отверстием диаметром 141,5 мм из стали 45 с толщиной стенки 28 мм с номинальным натягом на деформирующий элемент 1,5 мм и использованием в качестве смазки сульфофрезола нагрузка на одно кольцо составляет 92 т.

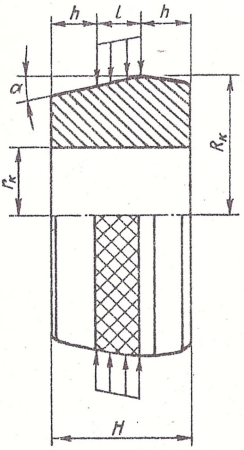

Рис. 2. Деформирующее кольцо симметрично нагруженной формы.

Деформирующими элементами на протяжках чаще всего служат кольца, оформленные снаружи двумя усеченными конусами (рабочим и обратным) и ци-

* Под бесконечной толщиной стенки понимается такая толщина, при которой ни при каких натягах пластическая деформация не выходит на наружный диаметр детали [2].

линдрической ленточкой между ними (рис. 2). Оптимальным является симметрично нагруженное кольцо, у которого зона нагрузки расположена на равных удалениях от его торцов [5, 26].

Работа деформирующими протяжками ведется на обычных протяжных станках или прессах. При проектировании протяжки, а также при выборе необходимого протяжного станка или пресса нужно знать силу протягивания, которая зависит от многих факторов. Основные из них – металл детали, диаметр отверстия, толщина стенок детали, натяг на кольцо, величина деформации, число одновременно находящихся в работе колец, геометрические параметры колец, применяемая смазка.

Силу протягивания наиболее целесообразно было бы рассчитывать по аналитической зависимости, выведенной на основе законов теории пластичности с учетом физико-механических свойств металла детали, размеров ее, формы деформирующих элементов, степени деформации, параметров процесса трения между деталью и деформирующими элементами и др. Ряд таких зависимостей разработан в основном для потребностей трубного производства, где процесс холодной раздачи труб используется сравнительно давно. Ниже приводим эти уравнения в порядке их опубликования в следующих обозначениях: Q – сила протягивания, кГ; $\sigma_т$ – предел текучести металла детали, кГ/мм^2; E – модуль упругости металла детали, кГ/мм^2; d_0 – диаметр отверстия до протягивания, мм; t_0 – толщина стенки детали до протягивания, мм; ε – величина пластической деформации (увеличение диаметра отверстия), мм; a – натяг на кольцо номинальный, мм (увеличение диаметра кольца по сравнению с предыдущим кольцом или для первого кольца по сравнению с диаметром отверстия до протягивания); μ – коэффициент трения между деталью и кольцом; α – половина угла рабочего конуса кольца, градус (радиан); b – ширина цилиндрической ленточки на кольце, мм; l_0 – длина детали до протягивания отверстия, мм; l – то же после протягивания, мм.

Уравнение Л.Е.Альшевского [6]

$$Q=1{,}15\pi\sigma_т\left(d_0 t_0+t_0^2\right)\left[1-\left(\frac{d_0+t_0}{d_0+t_0+\varepsilon}\right)^{K} e^{-\frac{2\mu b}{d_0+t_0+\varepsilon}}\right]. \qquad (1)$$

Здесь

$$K=\frac{tg\alpha+\mu}{(1-\mu tg\alpha)tg\alpha}.$$

Уравнение И.Л.Перлина [7, 8]

$$Q=1{,}05\pi\sigma_т\left(d_0 t_0+t_0^2\right)\left(1+\frac{2t_0}{d_0+\varepsilon}\right)\frac{tg\alpha+\mu}{(1-\mu tg\alpha)tg\alpha}\ln\left(\frac{d_0+t_0+\varepsilon}{d_0+t_0}\right). \qquad (2)$$

Уравнение Е.А.Попова [9]

$$Q=\pi\sigma_т\left(d_0 t_0+t_0^2\right)\left\{\left(1+\frac{tg\alpha}{\mu}\right)\left[1-\left(\frac{d_0+t_0}{d_0+t_0+\varepsilon}\right)^{\frac{\mu}{tg\alpha}}\right]+\right.$$

$$\left.+\sin\alpha\sqrt{\frac{t_0}{d_0+t_0+\varepsilon}}\left(\frac{d_0+t_0}{d_0+t_0+\varepsilon}\right)^{\frac{\mu}{tg\alpha}}\right\}(3-2\cos\alpha). \qquad (3)$$

Уравнение И.И.Казакевича [10]

$$Q=2\pi\frac{d_0+t_0}{2}t_0\sigma_T\left\{n+0{,}5\left(1+\frac{\mu}{tg\alpha}\right)\alpha\sqrt{\frac{2t_0}{d_0+t_0}\left[1-\pi\left(1-\frac{\mu}{tg\alpha}\right)\right]}\right\}.$$

где

$$n=\left(1+\frac{\mu}{tg\alpha}\right)\left\{\alpha\sqrt{\frac{2t_0}{d_0+t_0}\left[1-\left(1+\frac{\mu}{tg\alpha}\right)\frac{a}{d_0+t_0}\right]}+\right.$$

$$\left.+\frac{a}{d_0+t_0}\left[1+\frac{a}{2(d_0+t_0)}\left(1-\frac{\mu}{tg\alpha}\right)\right]\right\}. \qquad (4)$$

Уравнение В.Л.Колмогорова [11]

$$Q=\pi\sigma_T d_0 t_0\frac{2{,}025\frac{e}{d_0}\left(1+\frac{\varepsilon}{2d_0}\right)\left(\mu+tg\alpha\right)}{2tg\alpha\left(1-\mu tg\alpha\right)+\frac{L_0+L}{L_0}\mu\left(1-tg^2\alpha\right)}. \qquad (5)$$

Уравнение Ю.Г.Проскурякова [12]

$$Q=\sigma_T\left\{\left[\frac{1+\frac{\mu}{tg\alpha}}{1-\frac{\mu}{tg\alpha}}\ln\left(1+\frac{\varepsilon}{d_0}\right)+\frac{2\mu b}{d_0+\varepsilon}\right]\pi\left(d_0t_0+t_0^2\right)+0{,}28\left(2tg\alpha+\mu\right)F_1\right\}. \qquad (6)$$

Здесь

$$F_1=\frac{\pi}{4}\left[D_s^2-\left(d_0+\varepsilon\right)^2\right],$$

$$D_s^2=0{,}68\left(d_0+\varepsilon\right)^2\left\{\frac{E\varepsilon}{\sigma_T\left(d_0+\varepsilon\right)}+0{,}1\left[\sqrt{\left(10-\frac{d_0+2t_0}{d_0}\right)\left(\frac{d_0+2t_0}{d_0}-1\right)}-0{,}25\right]\right\}.$$

Уравнение С.И.Борисова и В.И.Стрижака [13]

$$Q=1{,}15\pi\sigma_T\left\{\frac{m}{m+1}\left[1-\left(\frac{d_0+t_0}{d_0+t_0+\varepsilon}\right)^{m+1}\right]+\right.$$

$$\left.+0{,}85\left[\frac{d_0}{d_0+2t_0}\left(1+tg\alpha\right)\left(1+\mu\right)\sqrt{\frac{\varepsilon tg\alpha}{3(d_0+t_0+\varepsilon)}}\left(\frac{d_0+t_0}{d_0+t_0+\varepsilon}\right)^{m+1}\right]\right\}\left(d_0t_0+t_0^2\right). \qquad (7)$$

Здесь

$$m=1+\mu tg\alpha.$$

Уравнение Авицура [14]

$$Q=\frac{2}{\sqrt{3}}\pi\sigma_T\left(d_0t_0+t_0^2\right)\left\{\sqrt{3}\ln\frac{d_0+\varepsilon}{d_0}-\right.$$

$$-\frac{1}{\left(\frac{d_0+2t_0}{d_0}\right)^2-1}\left[\left(\frac{\alpha}{\sin^2\alpha}-ctg\alpha\right)-\mu\left(ctg\alpha\ln\frac{d_0+\varepsilon}{d_0}+\frac{2b}{d_0+\varepsilon}\right)-\right.$$

$$\left.\left.-\left(\frac{d_0+2t_0}{d_0}\right)^2\left(\frac{\alpha_0}{\sin^2\alpha_0}-ctg\alpha_0\right)\right]\right\}. \qquad (8)$$

Здесь

$$\sin\alpha_0=\sin\alpha\frac{d_0+2t_0}{d_0}.$$

Уравнение Г.И.Шельвинского [15]

$$Q=\pi S_{0_{cp}}\left(\frac{d_0+a}{2}\right)a\left(1+\frac{\mu}{tg\alpha}\right)+\mu\pi S_0\left(d_0+a\right)b+$$

$$+\frac{2\pi}{\sqrt{3}}\sigma_{T.cp}\frac{d_0}{2}\left(d_0+t_0\right)tg\alpha\ln\left(1+\frac{2t_0}{d_0}\right). \qquad (9)$$

где $$S_0 = \frac{b'}{\sqrt{3}}\left(1-e^{-\frac{a}{d_0 c}}\right)\left[1-\frac{d_0^2}{(d_0+t_0)^2}\right]+\sigma_T \ln\left(1+\frac{2t_0}{d_0}\right),$$

$$S_{0cp} = \frac{S_0+\sigma_{T0}\ln\left(1+\frac{2t_0}{d_0}\right)}{2},$$

где b', c – коэффициенты, зависящие от механических свойств обрабатываемого металла [28]; σ_{icp} берется по кривой течения; $C = 0{,}04$ для стали 45. Во всех уравнениях σ_T – средняя величина предела текучести для соответствующей степени деформации; σ_{T0} – начальный предел текучести.

Рассмотрение приведенных уравнений показывает, что хотя все они относятся к периоду последних 20 лет, но имеют совершенно различную структуру и по-разному отражают влияние одних и тех же факторов процесса на силу протягивания. Поэтому, естественно, возникает сомнение в их точности. Достаточно полной экспериментальной проверки этих уравнений не производилось.

В Институте сверхтвердых материалов АН УССР, начиная с 1964 г., исследовался процесс обработки цилиндрических отверстий твердосплавными деформирующими протяжками в деталях их различных пластичных материалов и сплавов с разными режимами деформирования. При этих исследованиях измерялась сила протягивания и изучалось влияние на ее величину многочисленных факторов процесса протягивания. Накопленный экспериментальный материал позволяет проверить точность приведенных выше уравнений и, в случае необходимости, разработать эмпирические зависимости для их расчета в широких пределах изменения действующих в процессе факторов.

Ниже излагаются результаты исследований.

ОБОРУДОВАНИЕ, АППАРАТУРА, ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На силу протягивания основное влияние должны оказывать следующие факторы: физико-механические характеристики обрабатываемого материала, размеры детали (диаметр отверстия, толщина стенки, длина); параметры процесса деформирования (номинальный натяг на кольцо, суммарная пластическая деформация, скорость протягивания, технологическая смазка, относительное расположение деформирующих элементов); геометрические параметры и форма деформирующих элементов (углы рабочего и обратного конусов, ширина цилиндрической ленточки).

Исследования проводились по конструкционным и углеродистым сталям (табл. 1), по легированным, высоколегированным и нержавеющим сталям (табл. 2) и по цветным металлам и специальным сплавам (табл. 3). Всего было использовано 32 металла и сплава. Материалы были выбраны с учетом запросов различных отраслей промышленности. В большинстве случаев по этим материалам в Институте велись исследования по конкретным заданиям промышленных предприятий.

Таблица I

Сталь углеродистая качественная машиностроительная

Марка стали	Твердость НВ, не более		Механические свойства			
	Сталь горячекатаная	Сталь отожженная	Предел прочности при растяжении $\sigma_в$, кГ/мм^2	Предел текучести $\sigma_т$, кГ/мм^2	Относительное удлинение δ,%	Относительное сужение площади поперечного сечения ψ,%
Армко-железо	100	–	32	19	29	76
10	137	–	36 – 45	22	32	55
20	156	–	44 – 54	26	26	55
35	187	–	56 – 66	32	21	45
45	229	197	64 – 76	36	17	40
20Г	197	–	48 – 58	28	25	50
УВ(У8А)	–	187	62	37	22	28

Таблица 2

Стали легированные, высоколегированные и нержавеющие

Марка стали	Термообработка	Твердость	Механические свойства			
			$\sigma_в$, кГ/мм^2	$\sigma_т$, кГ/мм^2	δ,%	ψ,%
12ХН3А	Отжиг	НВ 217	100	85	12	55
30ХГСА	Закалка и высокий отпуск	НВ 320 – 341	110–130	85 – 95	12	–
40ХНМА	То же	НВ 310 – 331	110–125	85 – 95	10	55
30ХГСНА	Закалка и отпуск	HRC 45 – 49,5	160–180	140	9	45
18Х2Н4ВА-Ш	То же	НВ 269	120	105	12	55
38ХМЮА	Отжиг	НВ 215 – 225	100	85	14	50
38ХНМЮА	"	НВ 215				
Х18Н10Т	"	НВ 160 – 190	52	20	40	50
1Х18Н9Т	"	НВ 160 – 190	50	20	45	55
ЭИ643	Закалка и отпуск	HRC 46 – 51,5	170–200			
ШХ15	Отжиг	НВ 207	73	42	21	46
ТВМ	"	НВ 225	—	–	–	–

Таблица 3

Цветные и специальные сплавы и металлы

Марка сплава	Термообработка	Твердость НВ	Механические свойства			
			$\sigma_б$, кГ/мм²	$\sigma_т$, кГ/мм²	δ, %	ψ, %
АК6	Закалка и искусственное старение	I00–I25	36–39	28	8–II	—
Д16	То же	I20–I29	43–48	36–37	I0–II	—
В93	" "	I49–I6I	⩾48	44	6	—
В95	" "	I60–I77	50–56	4I–46	5–7	—
МЛ5пч	" "	56–63	⩾24	-II	5	—
Л62	—	60–62	38	I4,2	I5	26
ЛС59–I	—	80–83	40	I4	45	—
Бр.0ЦС 5–5–3	—	60	I5	—	6	—
Н50						
ВТ9	—	285–388	I05	—	8	I8–22
Ниобий НЭ–I	—					

Методика проведения экспериментов

Для проверки приведенных выше уравнений, выбора из них наиболее точного или разработки новой зависимости необходимо было экспериментальным путем определить закономерности влияния на силу протягивания следующих факторов: материала обрабатываемой детали и его технических характеристик; диаметра отверстия; толщины стенки детали; номинального натяга на кольцо; суммарной пластической деформации; угла рабочего конуса кольца; ширины цилиндрической ленточки кольца; угла обратного конуса кольца; расположения колец на протяжке; мгновенного положения колец в обрабатываемой детали; скорости протягивания; технологической смазки.

Изучение номенклатуры деталей, которые можно обрабатывать деформирующими протяжками в промышленности, позволило установить наиболее часто применяемые материалы (табл.I–3), диаметры отверстий (6–I50 мм), отношение наружного диаметра к диаметру отверстия детали (I,05 – 3 и выше).

При обработке отверстия операция деформирующего протягивания может применяться для получения высоких классов чистоты и точности обработанной поверхности, а также в качестве предварительной черновой операции для исправления некруглости и повышения точности черной необработанной поверхности отверстия заготовки. В первом случае протяжки имеют номинальные натяги на кольца a (разность диаметров последующего и предыдущего колец) от 0,0I мм до нескольких десятых миллиметра. Во втором – натяги на одно кольцо могут доходить до 2–3 мм.

Основное количество экспериментов проведено на втулках с диаметрами отверстий I9; 35; 66; I02,5 и I4I,5 мм с толщинами стенок 3; 7; I0; I4 и 28 мм. Кроме того, втулки из некоторых материалов изготовлены с толщиной стенки I; I,5; 2; 5 и 8 мм. Силы протягивания в толстостенных деталях (с практически бесконечной толщиной стенки) исследовали на втулках с

диаметрами отверстий 8; 14; 20; 32; 45 мм. Номинальные натяги на кольца были 0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3 мм. Кроме того, часть опытов была проведена при натягах 0,3 и 0,4 мм. Длина всех втулок составляла не менее двух диаметров отверстия.

Угол рабочего конуса колец 2α изменялся от $2\alpha = 4^0$ до $2\alpha = 50^0$. Ширина цилиндрической ленточки колец b от 0,2 до 5 мм; угол обратного конуса колец от $2\alpha_1 = 6^0$ до $2\alpha_1 = 18^0$. Скорость протягивания в опытах по влиянию скорости протягивания на силу изменялась от 0,02 до 15 м/мин.

Основные опыты по изучению влияния натяга на кольцо, диаметра отверстия, толщины стенки, смазки, положения кольца в детали на силу протягивания были проведены твердосплавными кольцами с углом $\alpha = 4^0$, $\alpha_1 = 4-5^0$ и шириной цилиндрической ленточки по табл. 4.

Таблица 4

Ширина цилиндрической ленточки

Скорость протягивания, м/мин	Номинальный натяг на кольцо мм	Конструкционные и низколегированные стали 10, 20, 20Х, 35, 45, 40Х и др.		Легированные и труднообрабатываемые стали и сплавы (30ХГСНА, 40ХНМА, 1Х18Н9Т, ниобий и др.)		Цветные сплавы (АК6, Д16, В93, В95, МЛ5пч и др.)	
		Деталь					
		тонкостенная $\frac{t_0}{d_a} < \frac{1}{3}$	толстостенная	тонкостенная $\frac{t_0}{d_0} < \frac{1}{3}$	толстостенная	тонкостенная $\frac{t_a}{d_0} < \frac{1}{3}$	толстостенная
0,02–0,5	до 0,1	0,4–0,6	0,1–0,3	0,3–0,5	0,1–0,3	0,3–0,4	0,1–0,2
	свыше 0,2 до 0,8	0,6–1,0	"	0,5–1,0	"	0,4–0,8	"
	свыше 1	1,0–2,5	"	1,0–2,0	"	0,6–1,5	"
1–15	до 0,1	1,0–1,5	0,3–0,5	0,8–1,2	0,3–0,5	0,8–1,0	0,2–0,3
	0,2–0,8	1,5–2	"	1,0–2,0	"	1,0–1,5	"
	свыше 1,0	3–5	"	2–4	"	2–3	"

Такая ширина ленточки выбиралась для того, чтобы исключить ее влияние на силу протягивания и предотвратить схватывание деформирующего кольца с обрабатываемым металлом. Большинство опытов (кроме опытов по влиянию скорости протягивания) было проведено на скорости протягивания 2,5 м/мин. Каждый опыт для большей точности результатов повторялся троекратно. Сила измерялась на отдельных деформирующих кольцах и на группах колец, одновременно находящихся в работе.

Протягивание производили на горизонтально-протяжном станке модели 7Б520 (сила тяги 20 Т), вертикально протяжном станке модели МАТУ-750 (сила 65 Т) и 200-тонном прессе ПММ-200. Большинство опытов проводили на горизонтально-протяжном станке 7Б520, который был оснащен индуктивным динамометром и динамометром на тензодатчиках, включенных последовательно,

а также устройством для измерения скорости и пути протягивания. Оснащение станка двумя динамометрами повышало точность измерения сил. Динамометр на тензодатчиках был малоинерционным и позволял фиксировать быстропротекающие процессы. Пресс ПММ-200 (ИЛП-200) и вертикально-протяжной станок МА7У-750 были оснащены специальными динамометрами на тензодатчиках.

Динамометр с индуктивными датчиками для измерения силы протягивания

Основной частью динамометра является корпус 3 (рис.3), во внутреннюю часть которого запрессовано ступенчатое кольцо 5 с наружной резьбой на уступе и внутренним цилиндрическим отверстием, в котором закреплен с

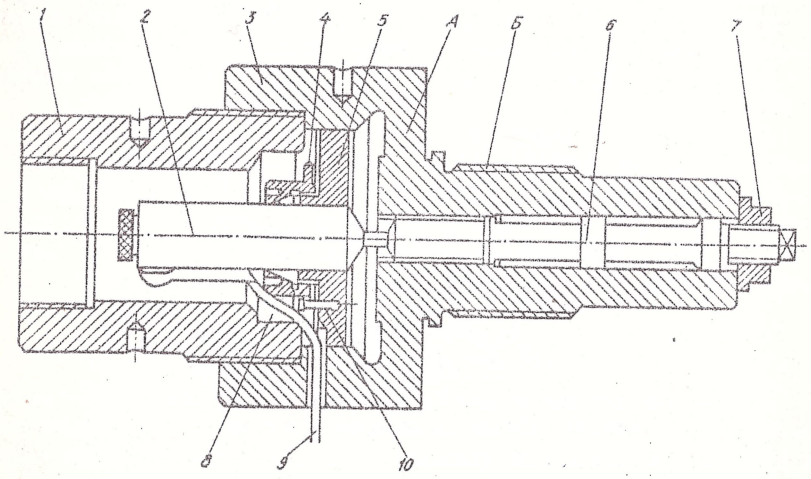

Рис. 3. Динамометр с индуктивным датчиком для измерения силы протягивания.

помощью сухарей 8 и гайки 4 индуктивный датчик 2. Для предотвращения самоотвинчивания в процессе работы гайка застопорена винтом 10. Шток индуктивного датчика 2 упирается в торец регулируемого упора 6, который ввернут в резьбовое отверстие хвостовика Б корпуса 3 и закреплен контргайкой 7. С помощью регулируемого упора 6 индуктивный датчик настраивается на "нуль". Регулировка упором 6 производится только в период сборки динамометра или смены индуктивного датчика.

Динамометр хвостовой частью Б корпуса ввернут в рабочую каретку горизонтально-протяжного станка. С противоположной стороны в корпус 3

ввернута на резьбе и закреплена втулка I, во внутрь которой ввинчивается хвостовик патрона для закрепления протяжки. Вся система вместе с кареткой станка перемещается при протягивании.

Сила, действующая на протяжку при работе, растягивает систему и упруго прогибает диафрагму (торцовую стенку) А корпуса. При этом упор 6 перемещается относительно датчика 2 совместно с его подпружиненным штоком, изменяющим индуктивность катушек. Диафрагма перемещается в пределах упругих деформаций. Поэтому это перемещение пропорционально действующей силе. Оно фиксируется индуктивным датчиком 2 и записывается самописцем, соединенным с датчиком проводами 9. Датчик включен в мост самописца по дифференциальной схеме, что повышает в 2 раза его чувствительность и исключает влияние температуры. Прогиб диафрагмы при наибольшей нагрузке (20 Т) составляет 0,08 мм. Жесткость динамометра 250 Т на I мм. Упругая система достаточно жесткая, что определяет безвибрационную работу динамометра.

Тарировка динамометра производилась на разрывной машине ГРМ-I ступенчатым нагружением на четырех диапазонах усилителя самописца с номинальными усилениями I000, 2000, 5000 и I0000 раз (что позволяет использовать в опытах различные масштабы записи на ленте бумаги самописца), а также непосредственно на станке с использованием образцового динамометра ДОРМ-I0.

Чтобы исключить влияние колебаний напряжения сети на показания динамометра и запись самописца, перед последним включается в сеть электронный стабилизатор напряжения переменного тока *ST*=500: Барабан, перемещающий бумажную ленту самописца, приводился в движение при рабочем ходе станка тросиком, соединенным с рабочей кареткой станка. Поэтому длина записи самописца была пропорциональна длине хода каретки станка.

Тензометрический динамометр для измерения силы протягивания

Применяется для тех же целей, что и динамометр с индуктивным датчиком. Динамометр (рис.4) состоит из корпуса 7, рабочих 5 и компенсационных тензодатчиков 4, кожуха 3, предохраняющего датчики от механических повреждений и попадания влаги, контргайки I, предотвращающей самоотвинчивание кожуха, и уплотнительных колец 2 и 6, препятствующих попаданию жидкости на датчики.

Динамометр хвостовиком Б соединяется с рабочей кареткой станка, а в переднюю часть корпуса ввертывается хвостовик патрона, в котором закрепляется протяжка. Сила протягивания, действующая на динамометр, упруго растягивает кольцевую поверхность А корпуса 7. Деформация кольцевой поверхности фиксируется тензодатчиками 5, наклеенными вдоль образующей, усиливается усилителем ТА-5 и регистрируется осциллографом Н-II5.

Наибольшая относительная деформация при максимальной нагрузке (20 Т) 0,001. Жесткость динамометра 600 Т на I мм. Упругая система достаточно жесткая, что определяет безвибрационную работу динамометра.

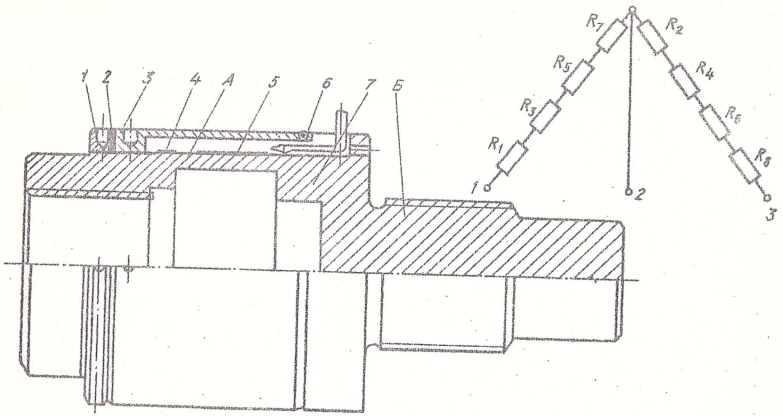

Рис.4. Тензометрический динамометр к горизонтально-протяжному станку для измерения силы протягивания.

Тарировка динамометра производилась аналогично описанному индуктивному динамометру с помощью образцового динамометра ДОРМ-10 непосредственно на протяжном станке. По сравнению с индуктивным тензометрический динамометр практически безынерционен. Усилитель включен в сеть через стабилизатор переменного тока ST=500.

Тензометрический динамометр для измерения сил при прошивании

Динамометр (рис. 5), применявшийся на станке МА7У-750 и прессе ППМ-200, состоит из корпуса 4, на поверхность рабочей шейки А которого наклеены рабочие 8 и компенсационные 5 тензодатчики. Они предохраняются от механических повреждений кожухом I, закрепленным на корпусе винтами 2. Уплотнительные прокладки 3 и 6 предотвращают от попадания СОЖ на датчики.

Динамометр опорной поверхностью В корпуса 7, выполненного в форме жесткого кольца, устанавливается на стол протяжного станка или пресса. Обрабатываемая деталь или прошивка устанавливается на поверхность Б корпуса, выполненную в виде жесткой плиты, чтобы устранить влияние неравномерной деформации кольцевой части А.

Усилие сжатия, создаваемое прошивкой, через опорную плиту воспринимается упругой кольцевой частью А, деформация которой фиксируется тензодатчиками 8, наклеенными вдоль образующей, усиливается усилителем ТА-5 и регистрируется осциллографом Н-115.

Датчики наклеены попарно в диаметрально противоположных точках и соединены между собой параллельно, что исключает влияние эксцентрично приложенной нагрузки.

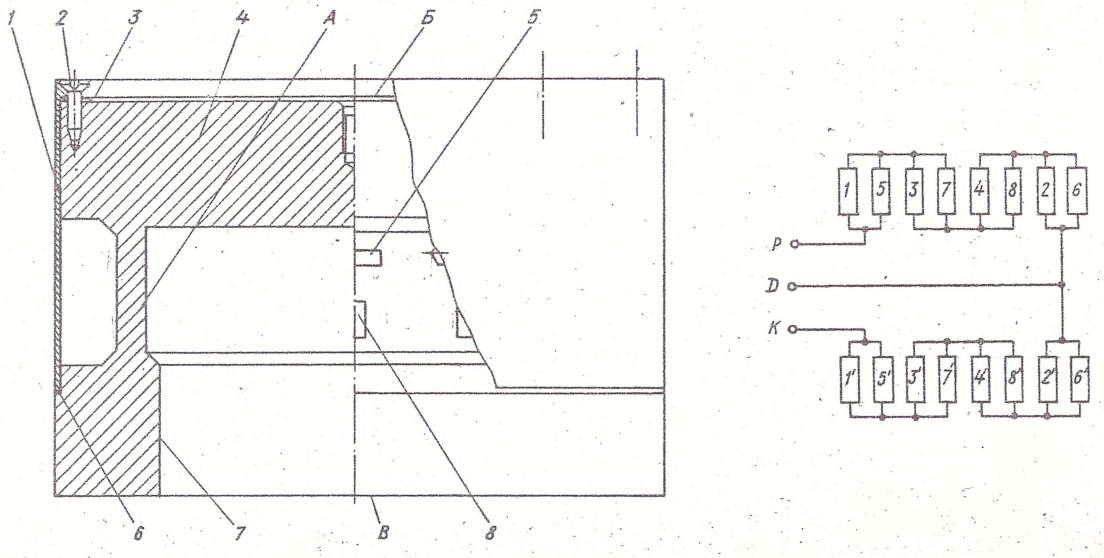

Рис.5. Тензометрический динамометр к вертикально-протяжному станку или прессу для измерения силы протягивания.

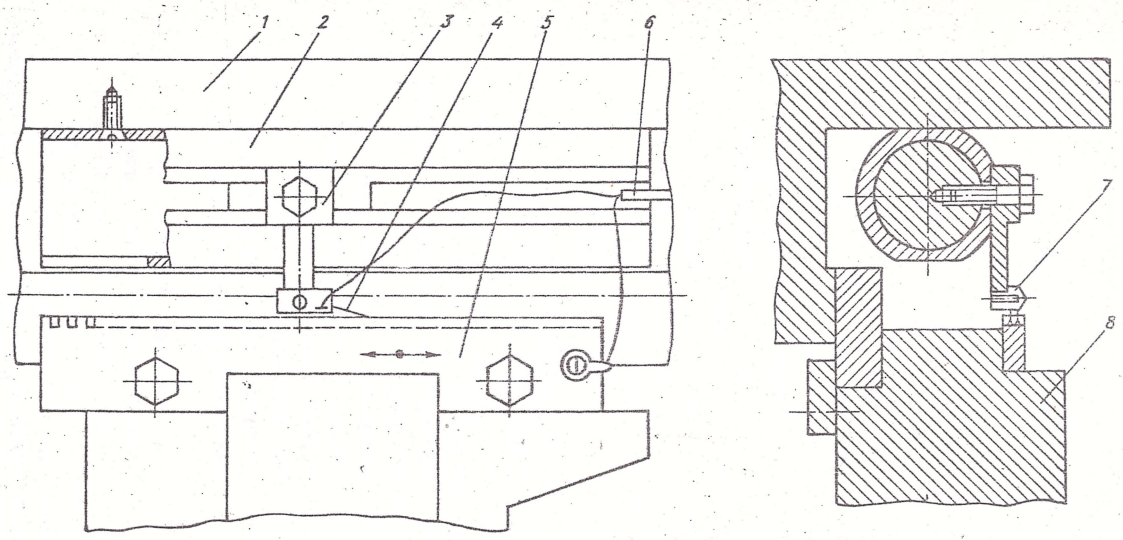

Рис. 6. Устройство для измерения пути перемещения рабочей каретки протяжного станка и скорости протягивания.

Наибольшая относительная деформация при максимальной нагрузке (200 Т) $\varepsilon = 0{,}002$. Жесткость динамометра 3990 Т на 1 мм. Достаточно жесткая упругая система определяет безвибрационную работу динамометра.

В случае приложения нагрузки в точке, отстоящей на расстоянии 100 мм от оси, показания прибора изменяются лишь на 5 %.

Тарировка динамометра производилась с помощью образцового динамометра ДОСМ-100 на прессе ИСП-200.

Устройство для измерения пути перемещения рабочей каретки протяжного станка и скорости протягивания

Для точного фиксирования изменения силы протягивания по длине обрабатываемой детали, что необходимо, например, для изучения краевого эффекта, протяжной станок модели 7Б520 был оснащен устройством для одновременного измерения пути перемещения рабочей каретки, скорости перемещения ее и равномерности движения регистрирующей бумаги осциллографа.

Необходимость оснащения станка таким устройством объясняется тем, что в момент входа кольца во втулку из-за переменной нагрузки изменяется скорость протягивания. Кроме того, скорость движения регистрирующей бумаги в осциллографах Н105 и Н115 не остается постоянной в процессе записи. Поэтому без оснащения станка специальным устройством невозможно определить силу и скорость протягивания в каждый заданный момент протягивания по длине детали.

Устройство (рис. 6) состоит из гребенки 5, укрепленной на рабочей каретке 8 станка. Гребенка имеет выступы и впадины, шаг которых равен 5,5 мм (ширина выступа 2,1 мм, впадины 3,4 мм). Впадины заполнены до уровня выступов изоляционным материалом (эпоксидной смолой). Токосъемник 4 через изолятор 7 закреплен на кронштейне 3, который можно перемещать вдоль хода рабочей каретки.

Кронштейн 3 перемещается по направляющей трубе 2, прикрепленной к корпусу 1 станка. Гребенка с токосъемником устройства и гальванометр осциллографа последовательно включены в электрическую цепь, состоящую из прецизионного источника переменного синусоидального напряжения известной частоты, в качестве которого используется звуковой генератор ЗГ-16. В эту же цепь включен и гальванометр для определения скорости перемещения бумаги.

Работает устройство следующим образом. При движении гребенки 5 вместе с кареткой 8 токосъемник, оставаясь неподвижным, скользит по гребенке, размыкая и замыкая электрическую цепь. В течение времени, когда цепь замкнута, на гальванометр подается синусоидальное напряжение с частотой f, которое записывается на регистрирующей бумаге. При разомкнутой цепи, когда напряжение на гальванометр не подается, на ней чертится прямая линия (рис.7, кривая I). Одновременно на эту же бумагу записывается сила протягивания (рис. 7, кривая 3) и непрерывная синусоида с частотой f (рис.7,

кривая 2), служащая для подсчета числа колебаний за время прохождения токосъемником выступов гребенки.

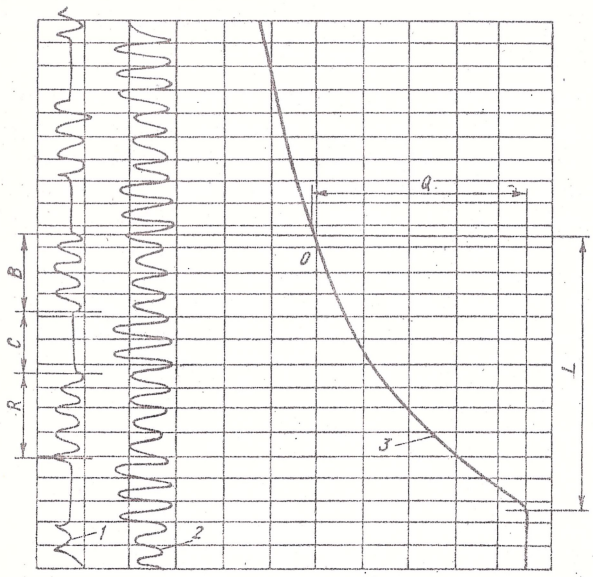

Рис. 7. Схема записи пути и скорости протягивания.

Длину пути при протягивании можно определить по формуле

$$L = (l_{i1} + l_{i2})\, n, \qquad (10)$$

где $l_{i1} + l_{i2} = S$ – шаг гребенки, мм; l_{i1} – ширина выступа, мм; l_{i2} – ширина впадины, мм; n – число шагов гребенки.

Скорость рабочей каретки станка на участке пути l_{i1} определяется по формуле

$$v_{i1} = \frac{l_{i1}}{T_{i1}}, \qquad (11)$$

где T_{i1} – время прохождения пути l_{i1},

$$T_{i1} = t_i\, n_i, \qquad (12)$$

где t_i – время одного периода колебаний синусоиды, $\frac{\text{сек}}{\text{пер}}$; n_i – число периодов на осциллограмме при прохождении токосъемником выступа гребенки. Время одного периода колебаний синусоиды

$$t_i = \frac{1}{f},$$

где f – частота колебаний синусоиды, гц. Тогда

$$T_{i1} = \frac{n_i}{f}, \qquad (13)$$

Подставляя (13) в (11), получаем

$$V_{i1} = \frac{l_{i1}\, f}{n_i}\, 6 \cdot 10^{-2} \text{ м/мин}, \qquad (14)$$

где l_{i1}, мм; f, гц.

Неравномерность хода регистрирующей бумаги определяется по различным величинам шага S синусоиды напряжения на различных участках детали.

ТОЧНОСТЬ УРАВНЕНИЙ, ПРЕДЛОЖЕННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА СИЛЫ ПРОТЯГИВАНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ АВТОРАМИ

Прежде чем приступить к выполнению трудоемких исследований по изучению влияния всех факторов процесса протягивания на силу протягивания при обработке различных материалов, были проведены по одному материалу специальные опыты, необходимые для оценки точности уравнений (I)-(9). Сравнение производилось при различных натягах, углах рабочего конуса кольца и толщине стенок детали. Так как в большинстве теоретических уравнений сила протягивания Q пропорциональна пределу текучести σ_T, мы посчитали более целесообразным показать влияние указанных выше факторов не на силу протягивания, а на отношение $\frac{Q}{\sigma_T}$, что перечисленные зависимости делает более общими, а не относящимися только к данному обрабатываемому материалу.

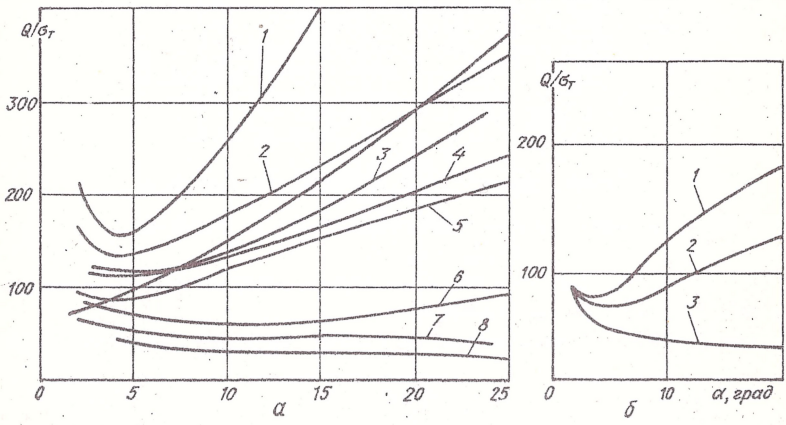

Рис. 8. Зависимость отношения $\frac{Q}{\sigma_T}$ от половины угла рабочего конуса при обработке втулок из стали 45 с $d_0 = 35$ мм, $t_0 = 6$ мм, $\varepsilon = 1$ мм; $\mu = 0{,}07$: а – I – Авищур, 2 – Монченко, Шельвинский; 3 – Казакевич; 4 – Проскуряков; 5 – по опытам; 6 – Борисов и Стрижак; 7 – Перлин; 8 – Колмогоров; б–I – опыты; 2 – Попов; 3 – Альшевский.

На рис. 8 – II представлено сравнение отношений $\frac{Q}{\sigma_T}$, полученных в опытах, с результатами расчетов по приведенным выше формулам для случая протягивания детали из стали 45 и исходного диаметра протягиваемого отверстия 35 мм. Деформирующее протягивание производилось рабочими элементами из сплавов ВК15 и ВК15М на скорости от 2 до 5 м/мин. Толщина стенки детали равна 6 мм, деформация (увеличение) отверстия в одном случае небольшая (0,1 мм), в другом – значительная (1,0 мм). Кроме того, взята

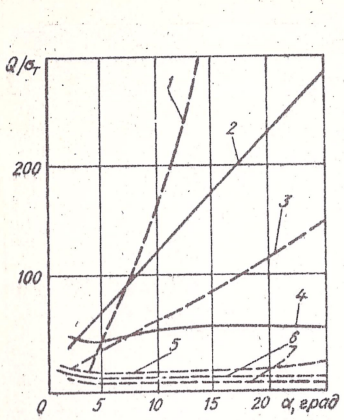

Рис.9. Зависимость отношения $\frac{Q}{\sigma_T}$ от половины угла рабочего конуса α при обработке втулок из стали 45 с $d_0 = 35$ мм, $t_0 = 6$ мм, $\varepsilon = 0,1$ мм, $\mu = 0,07$:

I – Авицур; 2 – Монченко; 3 – Попов; 4 – по опытам; 5 – Стрижак; 6 – Проскуряков; 7 – Колмогоров.

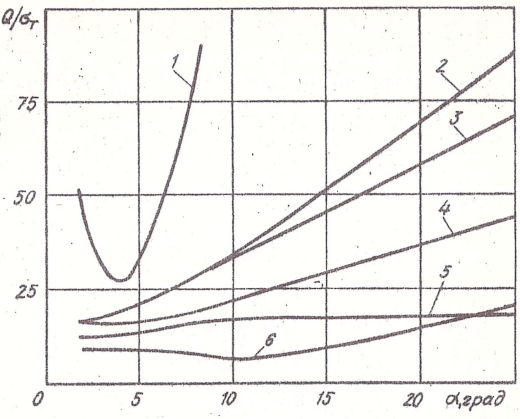

Рис. I0. Зависимость отношения $\frac{Q}{\sigma_T}$ от половины угла рабочего конуса α при обработке втулок из стали 45 с $d_0 = 35$ мм, $t_0 = 1,5$ мм, $\varepsilon = 0,5$ мм; $\mu = 0,07$:

I – Авицур; 2 – Шельвинский; 3 – Монченко; 4 – Проскуряков; 5 – по опыту; 6 – Попов.

толщина стенки I,5 мм и деформация 0,5 мм. Как эксперимент, так и расчет сделаны для случаев работы одного кольца. Коэффициент трения $\mu = 0,07$, что было получено в результате специальных опытов с использованием в качестве смазки сульфофрезола. Следует отметить, что даже значительное изменение этой величины несущественно влияет на результат расчета по формулам.

Кроме приведенных выше формул, расчет был произведен также по уравнению В.П.Монченко, метод вывода которого для нас не известен [17, 18]

$$Q = 1,1\frac{\pi}{4}\sigma_T\left[(2d_0+\varepsilon)\varepsilon\left(\ln\frac{d_0+2t_0}{d_0}+\ln\frac{d_0+2t_0+\varepsilon}{d_0}\right)\left(1+\frac{\mu}{\sin\alpha}\right)+3,08\alpha t\left(d_0+t_0+\varepsilon\right)\right]. \quad (15)$$

Рис. 8–II показывают, что разница в результатах расчетов по разным формулам очень велика и для больших значений угла рабочего конуса кольца может достигать сотен и тысяч процентов. Можно наблюдать совершенно противоположное течение закономерностей. Так, при $t = 6$ мм и $\varepsilon = 1,0$ мм по формулам Авицура, Монченко, Попова, Шельвинского, Казакевича, Проскурякова с увеличением угла рабочего конуса деформирующего элемента сила протягивания, пройдя через минимальное значение при $\alpha = 4–5^0$, быстро возрастает, по формуле Борисова и Стрижака этот рост незначительный, а по формулам Перлина, Колмогорова и Альшевского с увеличением α сила протягивания не увеличивается, а, наоборот, существенно уменьшается. Ни одна из формул не удовлетворяет результатам опытов. Наиболее близко к опытной

кривой при большой деформации ($\varepsilon = 1{,}0$ мм) расположена кривая, построенная по уравнению Проскурякова (рис. 8, а), при малой деформации расчет по этой формуле дает значения сил в 4–5 раз ниже опытных (рис.9).

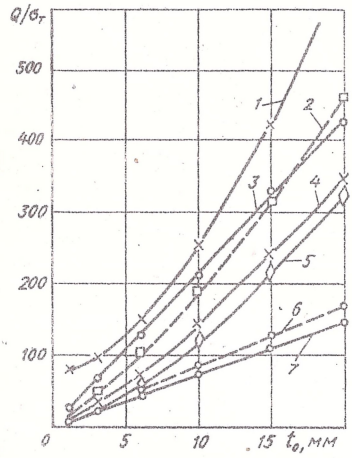

Рис. II. Зависимость отношения $\frac{Q}{\sigma_т}$ от толщины стенки t при обработке втулок из стали 45 с $d_0 = 35$ мм, $\varepsilon = 1$ мм, $\mu = 0{,}07$ и $\alpha = 4^0$: 1 – Авицур; 2 – Проскуряков; 3 – Монченко; 4 – по опытам; 5 – Перлин; 6 – Альшевский; 7 – Колмогоров.

На рис. I2 приведен экспериментально полученный график влияния половины угла рабочего конуса на силу протягивания при различных пластических деформациях от 0,05 до 1,0 мм, из которого видно, что с уменьшением деформации влияние угла становится менее существенным и при деформациях 0,05 – 0,1 мм им можно пренебрегать. Существуют оптимальные углы рабочего конуса, при которых сила протягивания имеет наименьшее значение. Это углы $\alpha = 4^0$. Они более четко проявляются при больших деформациях и не заметны при малых. Сравнение рис. 9 и II показывает, что уравнения Авицура, Монченко и Попова неправильно отражают влияние угла рабочего конуса на силу протягивания при малых деформациях. Влияние угла рабочего конуса зависит также от толщины стенки детали. Оно снижается с уменьшением толщины стенки.

Теоретические зависимости неправильно учитывают влияние угла рабочего конуса кольца на силу протягивания при различных толщинах стенки. Это подтверждается рис. I0, на котором даны результаты опытов, а также расчетов по приведенным выше уравнениям, для втулки с малой толщиной стенки. Также не точно эти уравнения учитывают влияние стенки детали на силу протягивания (рис. II), диаметра отверстия и величины деформации.

Таким образом, из изложенного выше следует, что ни одна из существующих формул, выведенных на основе законов теории пластичности, не дает удовлетворительного соответствия с результатами экспериментального определения силы протягивания. Это – следствие большой сложности процесса деформации при протягивании, трудности учета всех действующих факторов при

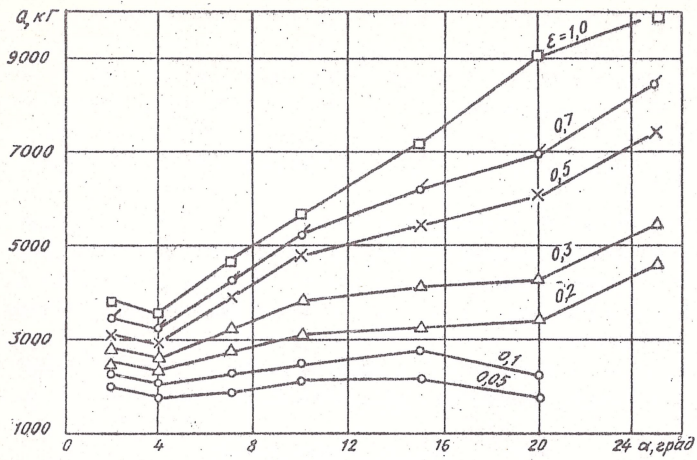

Рис. I2. Зависимость силы протягивания от половины угла рабочего конуса при обработке втулок из стали 45 с d_0 = 35,6 мм, t_0 = 6 мм, μ = 0,07 при различных пластических деформациях.

выводе теоретических уравнений и в ряде случаев неправильного представления о схеме деформации. В связи с этим было проведено большое число экспериментов (более I0000), которые позволили разработать эмпирические уравнения для расчета силы протягивания, дающие достаточную для практики точность.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА СИЛЫ ПРОТЯГИВАНИЯ

Предварительно проведенными экспериментами установлено, что эмпирическое уравнение для расчета силы протягивания, действующей на одном деформирующем элементе (кольце), имеет следующий вид:

$$Q = C\,\frac{t_0^{\pi} d_0^{y} HB}{a^2}\,K_i\left[\left(\sum_1^n \varepsilon\right)^m - \left(\sum_1^{n-1} \varepsilon\right)^m\right]. \qquad (I6)$$

Здесь $\sum_1^n \varepsilon$ – суммарная деформация отверстия детали (увеличение его диаметра, мм) после прохода через него n колец; $\sum_1^{n-1} \varepsilon$ – то же после прохода (n –I) колец; HB – твердость по Бринеллю металла детали до деформирования; C – коэффициент, зависящий от физико-механических характеристик металла детали, угла рабочего конуса кольца, применяемой смазки.

Если принять K_i=I, то уравнение (I6) позволяет рассчитать силу протягивания на n-м кольце протяжки, находящемся в обрабатываемом отверстии в зоне установившейся нагрузки (в достаточном удалении от концов отверстия).

В случае, если в отверстии одновременно находится несколько колец, что, естественно, увеличит общую нагрузку на протяжке или, если одно единственное кольцо находится близко от концов отверстия, что уменьшит силу протягивания, множитель K_l, учитывающий число одновременно находящихся в работе колец и их положение в отверстии, будет принимать значения $K_l \geq 1$. Ниже будет показано, как определяется величина этого множителя.

В соответствии со структурой уравнения (16) необходимо было экспериментально определить влияние на силу протягивания всех входящих в него факторов. Эта работа была выполнена для обрабатываемых металлов с широким диапазоном изменения t, d, a, ε, HB и ряда других факторов процесса протягивания.

В дальнейшем изложении будем касаться лишь небольшого числа обрабатываемых металлов, результаты исследования по всем металлам приведены в табл.5.

Влияние толщины стенки детали на силу протягивания

Толщина стенки детали в отличие от других факторов должна влиять на силу протягивания не монотонно. К такому предположению можно прийти на основании теоретических выводов А.Надаи [19], в соответствии с которыми пластическая деформация плоского кольца из идеально пластичного материала под влиянием внутреннего равномерно распределенного давления может охватить весь объем кольца от внутреннего до наружного диаметра лишь в том случае, пока отношение $\frac{D_0}{d_0} \leq 2{,}963$. Если это отношение будет больше, то внешняя часть кольца останется упруго деформированной. Причем давление на внутренней поверхности, а также окружные напряжения не могут превышать максимального значения $1{,}155\,\sigma_T$, где σ_T – предел текучести при одноосном растяжении. Если при деформирующем протягивании втулок будут наблюдаться такие же явления, то после некоторого критического отношения $\frac{D_0}{d_0}$ влияние толщины стенки на силу протягивания должно исчезнуть, и дальнейшее увеличение толщины стенки не должно вызывать возрастания силы протягивания.

Это было проверено экспериментально на разных диаметрах отверстий с изменением отношения наружного диаметра детали к внутреннему от 1,25 до 5,75. Приведем результаты проверки для двух сильно разнящихся металлов – алюминиевого сплава АК6 с твердостью НВ 125–135 и закаленной с отпуском стали 45 с твердостью НВ 310–335 кГ/мм^2. На рис. 13 и 14 показано влияние суммарного номинального натяга Σa на накопленную силу протягивания при разной толщине стенки и различном отношении наружного диаметра детали к внутреннему. На основании этих и таких же серий опытов для других условий их проведения построены графики рис. 15,а и 15,б, из которых видно влияние отношения наружного диаметра к внутреннему на накопленную силу протягивания. Рис. 15,а, построен в пропорциональных координатах; 15,б, в логарифмических. Для широкого диапазона действующих факторов (два ме-

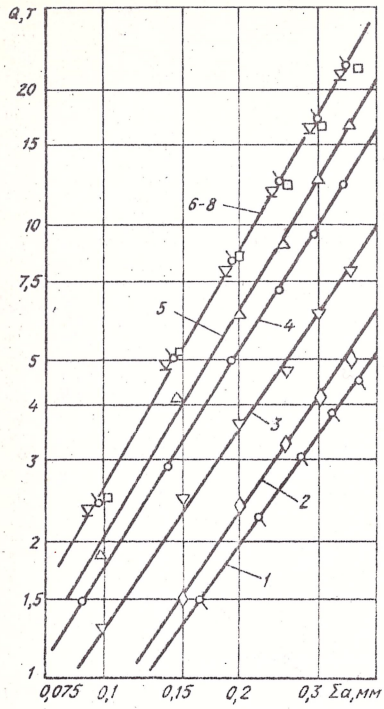

Рис. I3. Зависимость накопленной силы протягивания от суммарного номинального натяга при обработке втулок из сплава АК6, НВ I25-I35 с d_o = 32 мм, a=0,05 мм на скорости протягивания v = 0,5 м/мин,с применением сульфофрезола и отношением $\frac{D}{d_o}$ наружного диаметра к диаметру отверстия: I - I,25; 2 - I,28; 3 - I,4; 4 - I,94; 5 - 2,4; 6(□) - 3,I; 7 (○) - 3,85; 8(▽) - 5,75.

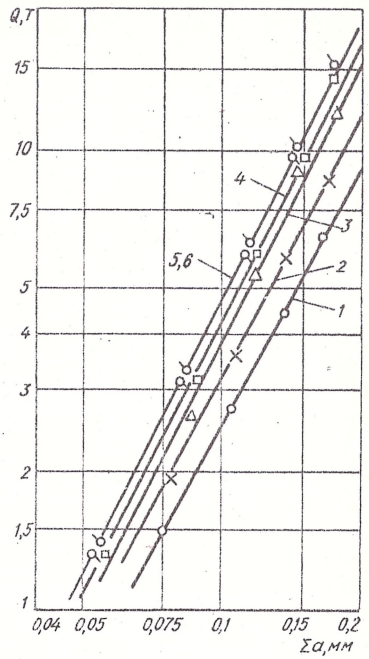

Рис. I4. Зависимость накопленной силы протягивания от суммарного номинального натяга при обработке втулок из стали 45, НВ 3I0-335 с d_o = 20 мм, a = 0,03 мм на скорости v = 0,5 м/мин,с применением сульфофрезола и отношением $\frac{D}{d_o}$ наружного диаметра втулки к диаметру отверстия: I - I,45; 2 - I,65; 3 - 2,0; 4 - 2,5; 5 (○) - 3,25; 6(○) - 4,4.

талла, три диаметра отверстия 20, 32 и 45 мм, три натяга на кольцо 0,0I, 0,03 и 0,05 мм, различные суммарные натяги вплоть до 0,4 мм) выводы А.Надаи подтверждаются для случаев обработки втулок из упрочняющихся металлов. Из рис. I5,а и б также следует, что при малых отношениях наружного и внутреннего диаметров толщина стенки сильно влияет на силу протягивания. Но, начиная с $\frac{D_o}{d_o} = 2$ это влияние начинает снижаться и при $\frac{D_o}{d_o}$ 2,5 - 3,0 совсем исчезает. Дальнейшее увеличение $\frac{D_o}{d_o}$ и толщины стенки втулки совершенно не влияет на силу протягивания и не вызывает ее увеличения.

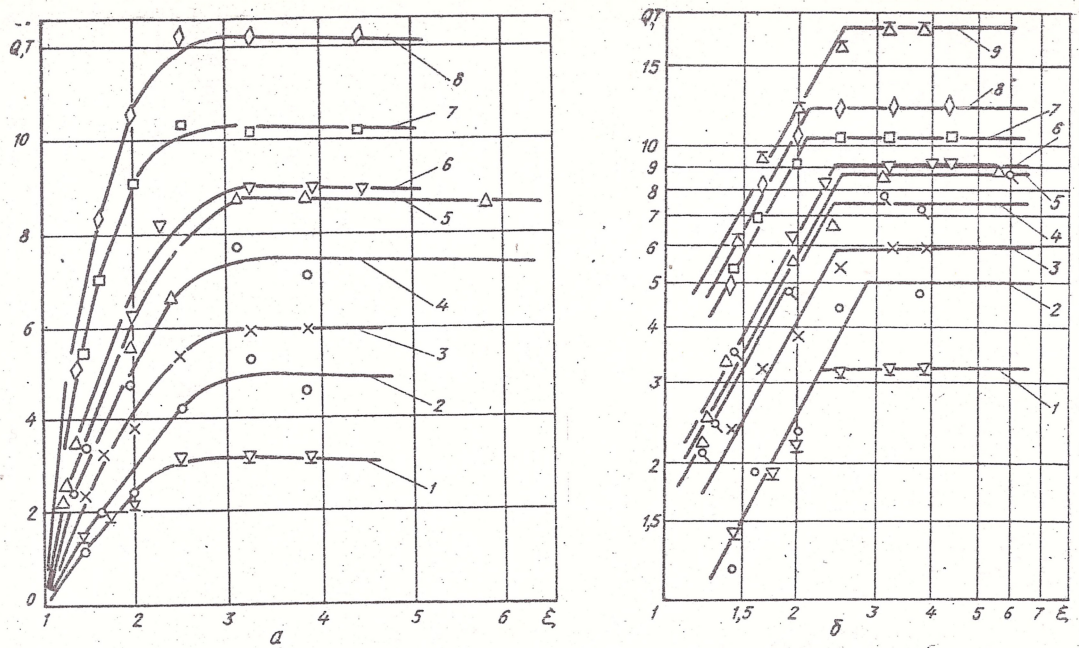

Рис. I5. Зависимость накопленной силы протягивания от отношения наружного диаметра обрабатываемой втулки к внутреннему диаметру при протягивании втулок на $v = 0,5$ м/мин кольцами с $\gamma = 5°$; $b = 0,2$ мм с применением сульфофрезола для сплава АК6, НВ I25–I35 (кривые I–6; 9) и стали 45, НВ 3I0–335 (кривые 7; 8): а – I – $d_0 = 20$ мм, $a = 0,03$ мм; $\Sigma a = 0,I2$ мм; 2 – $d_0 = 20$ мм, $a = 0,0I$ мм, $\Sigma a = 0,2$ мм; 3 – $d_0 = 20$ мм, $a = 0,05$ мм, $\Sigma a = 0,2$ мм; 4 – $d_0 = 32$ мм, $a = 0,03$ мм, $\Sigma a = 0,I5$ мм; 5 – $d_0 = 32$ мм, $a = 0,05$ мм, $\Sigma a = 0,2$ мм; 6 – $d_0 = 45$ мм, $a = 0,03$ мм, $\Sigma a = 0,I5$ мм; 7 – $d_0 = 20$ мм, $a = 0,03$ мм, $\Sigma a = 0,I5$ мм; 8 – $d_0 = 20$ мм, $a = 0,05$ мм; $\Sigma a = 0,2$ мм; б – I – $d_0 = 20$ мм; $a = 0,03$ мм, $\Sigma a = 0,I2$ мм; 2 – $d_0 = 20$ мм, $a = 0,0I$ мм, $\Sigma a = 0,2$ мм; 3 – $d_0 = 20$ мм, $a = 0,05$ мм, $\Sigma a = 0,2$ мм; 4 – $d_0 = 32$ мм, $a = 0,03$ мм, $\Sigma a = 0,I5$ мм; 5 – $d_0 = 32$ мм; $a = 0,05$ мм, $\Sigma a = 0,2$ мм; 6 – $d_0 = 45$ мм, $a = 0,03$ мм, $\Sigma a = 0,I5$ мм; 7 – $d_0 = 20$ мм, $a = 0,03$ мм; $\Sigma a = 0,I5$ мм; 8 – $d_0 = 20$ мм; $a = 0,05$ мм, $\Sigma a = 0,2$ мм; 9 – $d = 20$ мм; $a = 0,05$ мм, $\Sigma a = 0,4$ мм.

Таким образом, выводы А.Надаи полностью подтвердились для случая деформирующего протягивания втулок из упрочняющихся металлов.

В соответствии с полученными результатами все детали, подвергаемые деформирующему протягиванию, можно разделить на две группы: с конечной толщиной стенки ($\frac{D_0}{d_0} \leq 2{,}5 \div 2{,}9$; $\frac{t}{d_0} \leq 0{,}75 \div 0{,}95$), для которых сохраняется влияние толщины стенки t на силу протягивания и с бесконечной толщиной стенки ($\frac{D_0}{d_0} \geqslant 2{,}5 \div 2{,}9$; $\frac{t}{d_0} \geqslant 0{,}75 \div 0{,}95$), для которых толщина стенки на силу протягивания не влияет. При деформирующем протягивании отверстий в деталях с конечной толщиной стенки вся стенка может быть приведена в состояние пластического течения. При этом наружный диаметр детали будет увеличиваться по мере возрастания внутреннего. При протягивании можно применять крупные натяги на кольцо и большие суммарные пластические деформации, которые будут ограничиваться только пластичностью материала детали. При обработке детали с бесконечной толщиной стенки наружный диаметр детали не может получить сколь-нибудь существенного увеличения, так как пластическая деформация не достигает наружного диаметра цилиндра. При деформирующем протягивании отверстий в деталях с бесконечной толщиной стенки нет практического смысла применять большие натяги на кольцо или большие суммарные деформации, так как при этом металл будет вытекать на торцы детали и искажать ее форму. Поэтому и опыты, результаты которых представлены на рис. I2-I4, были проведены при малых натягах на кольцо и суммарных. Можно считать, что в этом случае целесообразно использовать номинальные натяги на кольцо не более $0{,}0015\,d_0$ и суммарный номинальный натяг не более $0{,}01\,d_0$. Номинальным натягом на кольцо называется разность диаметров соседних колец, а для первого кольца разность диаметра кольца и отверстия до протягивания. Суммарный номинальный натяг равен сумме номинальных натягов на всех кольцах. Номинальные натяги не учитывают упругой деформации отверстия при протягивании.

Таким образом, в случае протягивания отверстий в деталях с бесконечной толщиной стенки в эмпирическом уравнении (I6) толщина стенки детали t должна отсутствовать, так как она не влияет на силу протягивания. Кроме того, так как применяются только малые натяги и пластическая деформация ε в силу значительной упругой деформации будет существенно отличаться от суммарного натяга и не всегда известна, удобнее в уравнении силу протягивания выразить не в зависимости от величины пластической деформации, а в зависимости от суммарного номинального натяга. При этих условиях сила протягивания для детали с бесконечной толщиной стенки выразится следующей зависимостью:

$$Q = C\frac{d_0^{y} HB}{a^{r}}\left[\left(\sum_{1}^{n} a\right)^{m} - \left(\sum_{1}^{n-1} a\right)^{m}\right]. \qquad (I7)$$

Влияние натяга на кольцо, суммарного натяга и диаметра отверстия на силу протягивания при бесконечной толщине стенки

Взяв уравнение (I7) для расчета силы протягивания деталей с бесконечной толщиной стенки, экспериментально определили значения показателей

степеней у переменных. Из рис. I3; I4 и подобных, построенных для других обрабатываемых материалов, были определены показатели m суммарного натяга Σa. Показатель степени m можно назвать показателем упрочнения, так как он характеризует влияние натяга, а следовательно, и деформации на силу, необходимую для осуществления деформации, он всегда больше единицы, что, вероятно, является результатом упрочнения обрабатываемого металла при его деформировании.

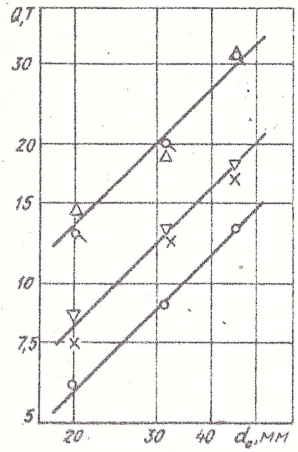

Рис. I6. Зависимость накопленной силы протягивания от диаметра отверстия при обработке отверстий в деталях с бесконечной толщиной стенки с применением масла АМГ-I0 при a=0,03 мм, Σa=0,2 мм, v=5 м/мин, α=5°:
o – сплав АК6, × – сплав В93, ▽ – сплав В95, △ – сталь 40ХНМА, ○ – сталь 30ХГСА.

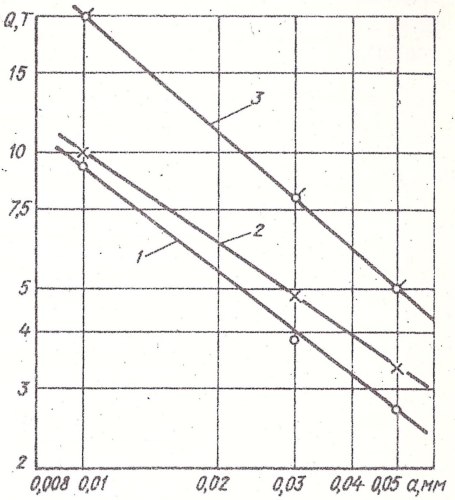

Рис. I7. Зависимость накопленной силы протягивания от номинального натяга на кольцо при обработке отверстий d_o=20 мм в деталях с бесконечной толщиной стенки с применением масла АМГ-I0 при Σa= 0,I5 мм, v= 0,5 м/мин, α = 5°:
o – сплав АК6; × – сплав В93; σ – сталь 30ХГСА.

Из табл. 5 следует, что лишь в одном случае этот показатель оказался равным единице. Этот случай не характерен, так как здесь была применена эффективно экранирующая смазка и вся сдвиговая деформация была локализована в слое смазки.

Из рис. I3 и I4 видно, что при протягивании деталей с бесконечной толщиной стенки при широком изменении толщины стенки показатель m для данного металла – величина постоянная. При переходе к конечной толщине стенки и дальнейшем ее уменьшении этот показатель имеет тенденцию к уменьшению.

Показатель степени у диаметра y определялся из графика рис. I6

и подобных для других обрабатываемых металлов, а показатель степени у натяга r из рис. I7 и подобных ему.

В табл. 5 даны значения показателей степеней и коэффициентов для различных обрабатываемых металлов для деталей с бесконечной толщиной стенки в случае применения натягов на одно кольцо не более 0,05 мм.

Уравнение (I7) позволяет рассчитать силу на одном кольце, находящемся в зоне установившейся нагрузки. Если одновременно в обрабатываемой детали будет находиться i колец, то общую силу протягивания можно определить по уравнению

$$Q_i = C \frac{d_0^y HB}{a^r} \left[\left(\sum_1^n a \right)^m - \left(\sum_1^{n-i} a \right)^m \right] \qquad (I8)$$

Это уравнение дает точные результаты, если все i работающих колец будут расположены в зоне установившейся нагрузки.

Если одно-два кольца будут находиться вблизи входа в отверстие или выхода из него, то в связи с тем, что нагрузка на деформирующих кольцах возрастает при входе не мгновенно, а на некотором пути $L_{вх}$, так же, как при выходе падает на некотором пути $L_{вых}$ (рис. I8), уравнение (I8) будет давать несколько завышенные результаты. Скорректировать эту ошибку можно, если учесть величины $L_{вх}$ и $L_{вых}$, которые были определены нами экспериментально по осциллограммам силы протягивания. На рис.I9 и 20 представлены $L_{вх}$ и $L_{вых}$ в зависимости от суммарного натяга на кольцо

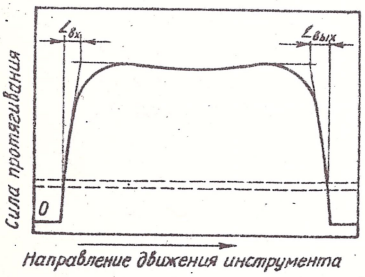

Рис. I8.Осциллограмма записи силы протягивания одиночного кольца через отверстие втулки диаметром 32 мм из сплава АК6,НВ I29, $a = 0{,}03$ мм, $\Sigma a = 0{,}15$ мм, $v = 0{,}5$ м/мин.

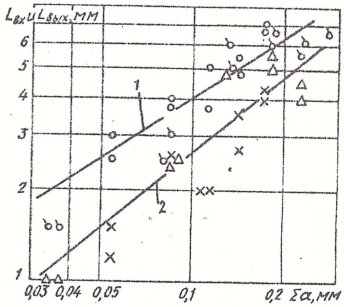

Рис. I9. Зависимость длины входа $L_{вх}$ (прямая I) и выхода $L_{вых}$ (прямая 2) от суммарного номинального натяга при обработке отверстий $d_0 = 20$ мм в деталях с бесконечной толщиной стенки из стали 45, НВ 3I0–335 с применением сульфофрезола $v = 0{,}5$ м/мин, $\alpha = 5^0$; $o, x - a = 0{,}03$ мм; $o, \Delta - a = 0{,}05$ мм.

для случаев протягивания отверстий в деталях из стали 45 и алюминиевого сплава АК6. Оказалось, что для всех исследованных металлов при бесконечной толщине стенки эти величины могут быть представлены общими простыми зависимостями

$$L_{вх} = 17{,}4\,(\Sigma a)^{0{,}57}, \qquad (19)$$

$$L_{вых} = 18{,}6\,(\Sigma a)^{0{,}78}. \qquad (20)$$

Если упрощенно считать, что на длине $L_{вх}$ и $L_{вых}$ осевая сила на кольце возрастает от нуля до максимума и падает от максимума до нуля по закону прямой, то не представит затруднений определить сниженную нагрузку на кольцах, находящихся в зонах входа и выхода. Этот вопрос имеет более существенное значение при протягивании с большими натягами отверстий в деталях с конечной толщиной стенки, в приложении к чему он будет изложен более подробно. Там же будет показано, что сила протягивания пропорциональна твердости по Бринеллю обрабатываемого металла.

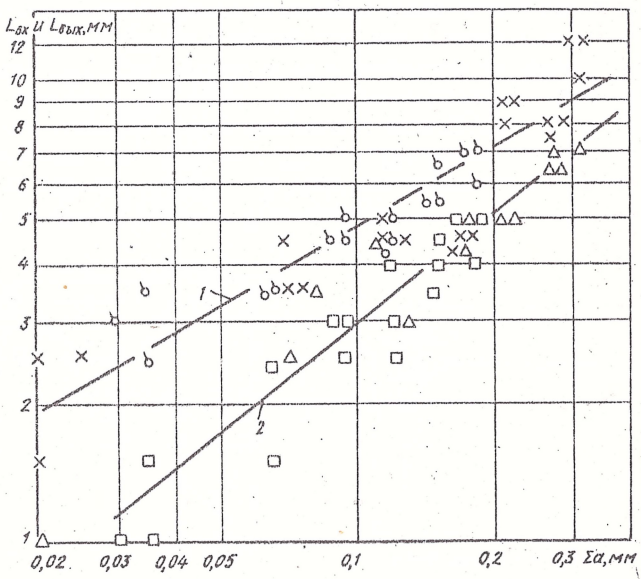

Рис.20. Зависимость длины входа $L_{вх}$ (прямая I) и выхода $L_{вых}$ (прямая 2) от суммарного номинального натяга при обработке отверстий $d_0 = 45$ мм в деталях с бесконечной толщиной стенки из сплава АК6, НВ 125–135 с применением сульфофрезола, $v = 0{,}5$ м/мин, $\alpha = 5°$: o, □ – $a = 0{,}03$ мм; x, Δ – $a = 0{,}05$ мм.

Влияние основных факторов процесса на силу протягивания отверстий в деталях с конечной толщиной стенки

Прежде всего изложим результаты по изучению влияния толщины стенки на силу протягивания. На рис. 21 и 22 показано влияние пластической деформации и толщины стенки на силу протягивания при двух натягах на кольцо (0,05 и 0,2 мм). На основании этих рисунков построен график, представ-

Таблица 5

Обрабатываемый материал	Смазка	C	x	y	r	m
Для деталей с конечной толщиной стенки; $\frac{t}{d_0} \leq 0{,}3-0{,}4$						
Сталь 10	Сульфофрезол	0,20	1,60	0,52	0,72	1,22
Сталь 20	"	0,52	1,32	0,35	0,72	1,22
Сталь 20Х	"	0,35	1,44	0,42	0,68	1,22
Сталь 35	"	0,54	1,32	0,35	0,72	1,22
Сталь 45	"	0,51	1,32	0,31	0,76	1,22
Сталь 40Х	"	0,60	1,12	0,42	0,71	1,16
Сталь 20Г	"	0,44	1,40	0,40	0,64	1,22
Сталь У8	"	0,60	1,20	0,30	0,80	1,22
Сталь 12ХН3А	"	0,26	1,37	0,56	0,67	1,20
Сталь 38ХНМЮА	"	0,41	1,32	0,35	0,72	1,22
Сталь 38ХМЮА	"	0,41	1,32	0,35	0,72	1,22
Сталь 18Х2Н4ВА-Ш	АСМ-1, АСМ-6	0,17	1,30	0,56	0,67	1,05
Сталь ШХ15	Сульфофрезол	0,39	1,27	0,39	0,71	1,28
Армко-железо	"	0,20	1,60	0,52	0,75	1,22
Сталь ТВМ	"	0,62	1,42	0,33	0,72	1,22
Сталь Х18Н10Т	АСМ-1, АСМ-6	0,43	1,35	0,35	0,72	1,22
Сталь 1Х18Н9Т	" "	0,43	1,35	0,35	0,72	1,22
Сплав АК6	Сульфофрезол	0,19	1,55	0,50	0,52	1,22
Сплав ВТ9	$\frac{d_1}{d_2}$	0,25	1,16	0,50	0,65	1,0
Ниобий НЭ-1	АСМ-4, АСМ-5 АСМ-6	0,25	1,55	0,50	0,52	1,22
Сплав Н50	Сульфофрезол	0,41	1,48	0,35	0,77	1,25
Латунь Л62	"	0,75	1,60	0,11	0,70	1,22
Латунь ЛС 59-1	"	0,49	1,06	0,57	0,62	1,22
Бронза Бр.ОЦС 5-3-3	"	0,99	1,20	0,31	0,70	1,27
Для деталей с бесконечной толщиной стенки; предельный натяг 0,05 мм; $\frac{t}{d_0} \geq 1$						
Сталь 10	Сульфофрезол	2,97	–	1,0	0,79	1,40
Сталь 20	"	3,75	–	0,92	0,81	1,55
Сталь 45	"	3,71	–	0,92	0,80	1,65
Сталь У8	"	2,84	–	1,0	0,82	1,7
Сталь 40ХНМА	Масло АМГ-10	1,53	–	1,0	0,91	1,8
Сталь 30ХГСА	"	2,28	–	1,0	0,83	1,9
Сталь 30ХГСНА HRC45-50	АСФ-3	261*	–	0,8	0,97	1,5
Сталь ЭИ643, HRC 48-51,5	"	470*	–	0,68	0,93	1,55
Сплав МЛ5пч,	Масло АМГ-10	1,20	–	1,0	0,91	1,5
Сплав АК6	" "	2,74	–	1,0	0,76	1,73
Сплав Д-16	" "	1,90	–	1,0	0,82	1,7
Сплав В93	" "	3,31	–	1,0	0,66	1,6
Сплав В95	" "	1,70	–	1,0	0,82	1,65

* 261 и 470 являются произведением с НВ.

ленный на рис. 23, из которого видно, что при конечной толщине стенки влияние ее на силу протягивания очень велико, сила протягивания растет быстрее толщины стенки. Это влияние постоянное – от малых толщин ($t = 0{,}08 d_0$) до очень значительных ($t = 0{,}4 d_0$), находящихся в пределах конечной толщины стенки. Табл. 5 показывает, что показатель степени x при толщине стенки в уравнении (16) для всех металлов оказывается больше единицы. При переходе к бесконечной толщине стенки (рис. 15,б; 23) этот показатель настолько быстро падает до нуля, что промежуточные значения можно не учитывать.

На рис. 24 представлено влияние пластической деформации на силу протягивания; специально подобраны опыты по стали 45, проведенные в широком диапазоне изменения диаметров отверстий (I9–I4I,5 мм), толщины стенок (7–27,3 мм), натягов (0,2–2,0 мм) и деформаций (до 20% от диаметра отверстия), что сделано для того, чтобы установить независимость показа-

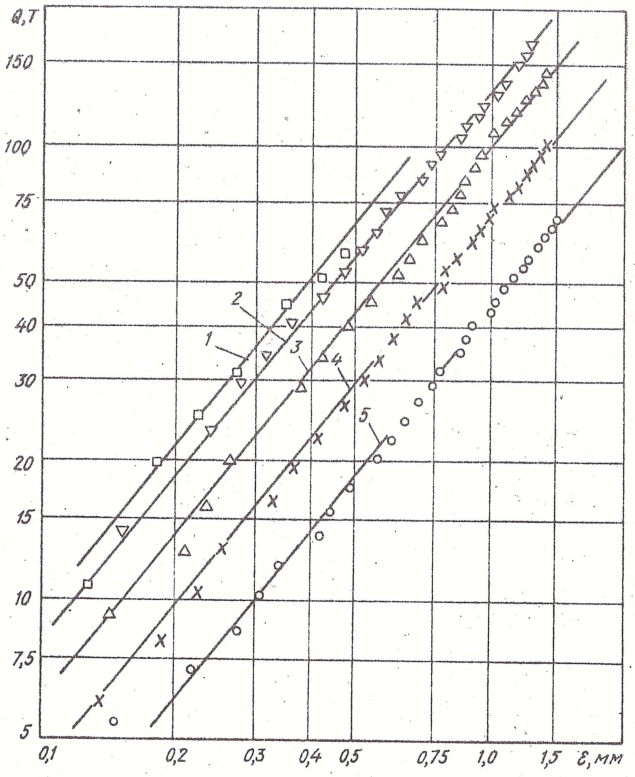

Рис. 2I. Зависимость накопленной силы протягивания от пластической деформации при обработке втулок из стали 45, НВ I96–200 с d_0 = 35 мм, a = 0,05 мм, на скорости протягивания v = 2,5 м/мин с применением сульфофрезола и толщиной стенок t_0:
I – 26 мм; 2 – I7,3 мм; 3 – I3,8 мм; 4 – I0 мм; 5 – 7 мм.

теля упрочнения m от широкого изменения перечисленных выше факторов. Из этого рисунка также следует, что нагрузка на отдельных твердосплавных кольцах протяжки может достигать очень высоких значений (50–60 т). В табл.5 даны значения показателя упрочнения m для различных материалов, полученные на основании опытов.

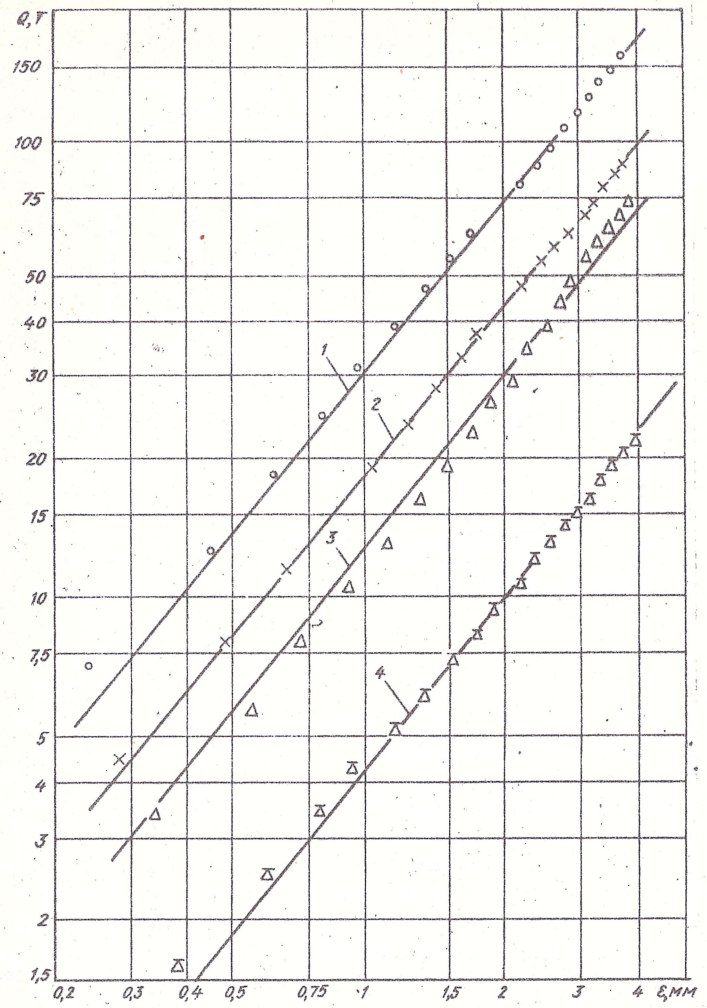

Рис.2. Зависимость накопленной силы протягивания от пластической деформации при протягивании втулок из стали 45, НВ 196–200 с d_o = 35 мм, α = 0,2 мм, на скорости протягивания v = 2,5 м/мин с применением сульфофрезола и толщинами стенок t_o :
1 – 13,8 мм; 2 – 10 мм; 3 – 7 мм; 4 – 3 мм.

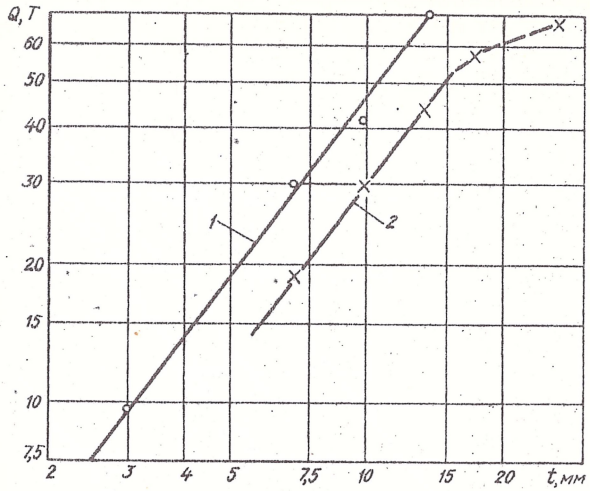

Рис. 23. Зависимость накопленной силы протягивания от толщины стенки при обработке втулок из стали 45, НВ 196–200 с d_0 = 35 мм на v = 2,5 м/мин с применением сульфофрезола:
I – a = 0,2 мм; ε = 2 мм; 2 – a = 0,05 мм; ε = 0,5 мм.

Влияние натягов на кольцо на накопленную силу протягивания показано на рис. 25–27. Натяги на кольцо изменялись от 0,05 до 2 мм. Из рис. 27 видно, что с увеличением натяга на кольцо накопленная сила протягивания, необходимая для осуществления заданной деформации, быстро уменьшается. Так, для деформации I мм при натяге 0,05 мм необходимо пропустить 20 колец и накопленная сила протягивания составляет 43 т; при натяге 0,5 мм потребуется два кольца и накопленная сила протягивания 7,5 т, при натяге I мм – одно кольцо с силой протягивания 4,3 т. Следовательно, во всех случаях, где этому не препятствует необходимая высокая точность и низкая шероховатость обработанной поверхности целесообразно применять большие натяги на кольцо.

Влияние диаметра d_0 на накопленную силу протягивания при двух различных натягах (0,2 и I мм) и степенях деформации (2 и 5 мм) показано на рис. 28. Диаметры изменялись в пределах I9–I50 мм, а сила протягивания возрастала значительно медленнее увеличения диаметра.

В опытах по изучению влияния исходной твердости обрабатываемого материала на силу протягивания использовались втулки из различных материалов твердостью от НВ 60 (Мл5пч) до HRC 5I,5 (ЭИ643). Отметим, что при

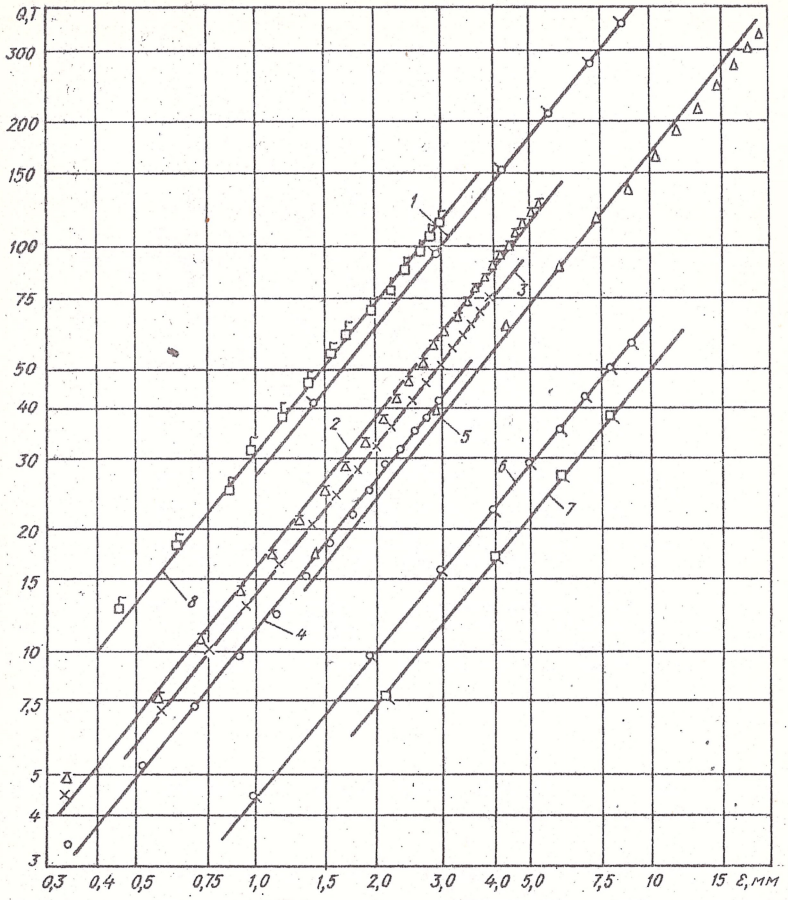

Рис. 24. Зависимость накопленной силы протягивания от пластической деформации при обработке втулок из стали 45, НВ 196–200 на $v = 2{,}5$ м/мин с применением сульфофрезола:
I – $d_0 = 141{,}5$ мм, $t_0 = 27{,}3$ мм, $a = 1{,}5$ мм; 2 – $d_0 = 67$ мм, $t_0 = 7$ мм, $a = 0{,}2$ мм; 3 – $d_0 = 0{,}35$ мм, $t_0 = 7$ мм, $a = 0{,}2$ мм; 4 – $d_0 = 19$ мм, $t_0 = 7$мм, $a = 0{,}2$ мм; 5 – $d_0 = 102{,}5$ мм, $t_0 = 14$ мм, $a = 1{,}5$ мм; 6 – $d_0 = 35$ мм, $t_0 = 7$ мм, $a = 1$ мм; 7 – $d_0 = 66$ мм, $t_0 = 7$ мм, $a_0 = 2$ мм; 8 – $d_0 = 35$ мм, $t_0 = 14$ мм, $a = 0{,}2$ мм.

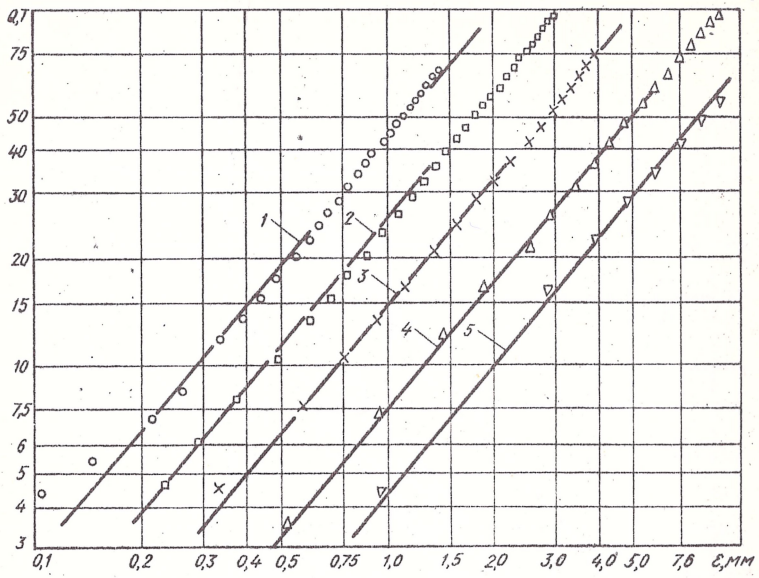

Рис. 25. Зависимость накопленной силы протягивания от пластической деформации при обработке втулок из стали 45, НВ 196–206 с d_0=35 мм, t_0=7 мм на v=2,5 м/мин с применением сульфофрезола:
1 – a=0,05 мм; 2 – a=0,1 мм; 3 – a=0,2 мм; 4 – a=0,5 мм; 5 – a=1 мм.

твердости HRC 45 могут быть осуществлены лишь небольшие пластические деформации ввиду малой пластичности закаленных до такой твердости материалов.

В широком диапазоне зависимость силы протягивания от твердости исследована до твердостей порядка НВ 400. На рис. 29 показана зависимость накопленной силы протягивания от пластической деформации при обработке втулок из стали У8 с диаметром отверстия 35 мм и толщиной стенки 7 мм.

Твердость втулок изменялась в пределах НВ 180–404, номинальные натяги на кольцо были a=0,1 мм и a=0,3 мм. Из рис. 29 видно, что твердость практически не влияет на показатель упрочнения металла: с увеличением ее сила протягивания растет. По данным рис. 29 построены графики зависимости накопленной силы протягивания от твердости обрабатываемой втулки (рис. 30) Сила протягивания увеличивается прямо пропорционально твердости, как при номинальном натяге на кольцо a=0,3 мм (прямая 1), так и при натяге a=0,1 мм (прямая 2).

Аналогичные результаты получены при обработке втулок из других ма-

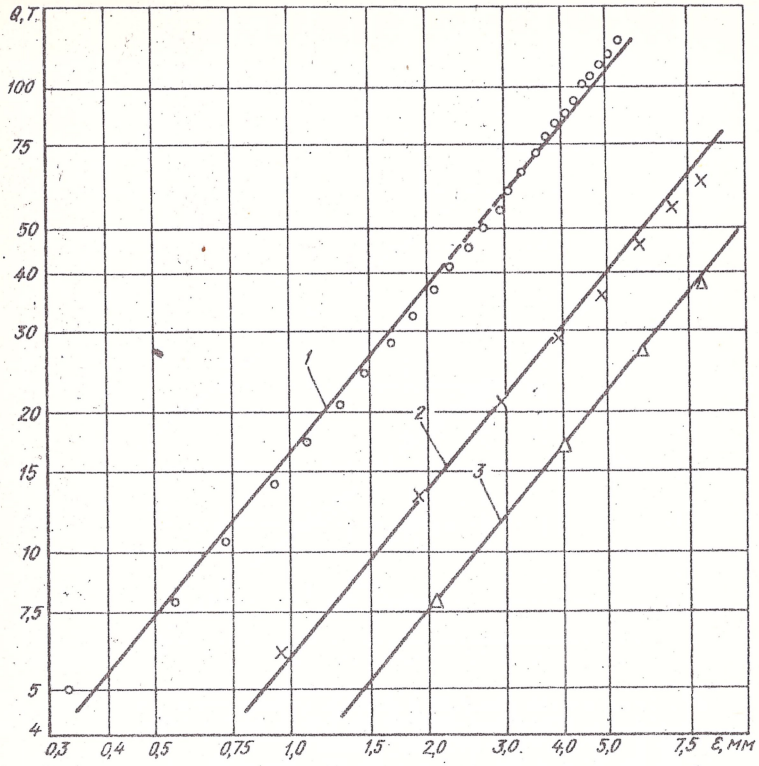

Рис. 26. Зависимость накопленной силы протягивания от пластической деформации при обработке втулок из стали 45, НВ 196–200 с t_0 = 7 мм на =2,5 м/мин с применением сульфофрезола:
1 – a = 0,2 мм, d_0 = 67 мм; 2 – a = 1 мм, d_0 = 66 мм; 3 – a = 2 мм, d_0 = = 66 мм.

териалов. Таким образом, твердость, выраженная в единицах по Бринеллю или Виккерсу, должна входить в числитель уравнения для расчета силы протягивания в первой степени.

Исследовано влияние скорости на силу протягивания в пределах 0,02–15 м/мин. Такой интервал скоростей выбран потому, что обработка отверстий деформирующими протяжками может производиться на протяжных станках или прессах. На протяжных станках детали могут протягиваться со скоростью до 15 м/мин. Кроме того, в производстве часто используются прессы со значительно меньшей скоростью перемещения рабочего органа. Протягивание со скоростью 0,02 м/мин нами производилось на машине для растяжения ГРМ-1, а со скоростью от 0,5 до 15 м/мин на горизонтально-протяжном

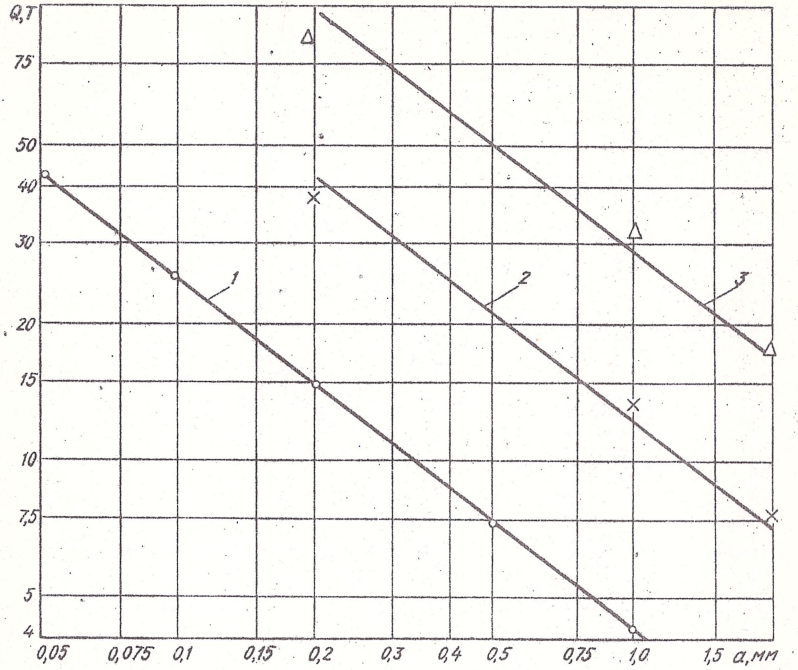

Рис. 27. Зависимость накопленной силы протягивания от номинального натяга на кольцо при обработке втулок из стали 45, НВ 196–200 с t_0 = 7 мм на V=2,5 м/мин с применением сульфофрезола:
1 – d_0 = 35 мм, ε = 1,0 мм; 2 – d_0 = 66 мм, ε = 2 мм; 3 – d_0 = 66 мм, ε = 4 мм.

станке 7Б520. Обрабатывались втулки с диаметром отверстия 35 мм и толщиной стенки 7 мм. Номинальный натяг на кольца был 0,1 мм.

В результате опытов установлено, что при снижении скорости протягивания с 15 до 0,02 м/мин сила протягивания несколько увеличивается. Изменение скорости в интервалах 0,5–15 м/мин практически не влияет на силу протягивания. Поэтому в этом диапазоне скоростей силу протягивания можно считать не зависимой от скорости.

Влияние ширины цилиндрической ленточки на силу протягивания требовало изучения, так как по вопросу взаимодействия кольца с обрабатываемым металлом есть две точки зрения.

Одни авторы [12,20] считают, что кольцо контактирует с обрабатываемым металлом по переднему (рабочему) конусу 1 кольца, цилиндрической ленточке 2 и по незначительной части обратного конуса 3 (рис. 31), причем ширина контакта по рабочему конусу определяется только геометриче-

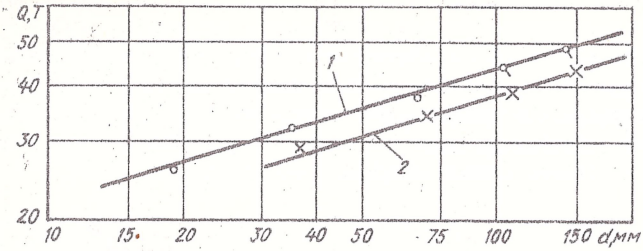

Рис. 28. Зависимость накопленной силы протягивания от диаметра отверстия при обработке втулок из стали 45, НВ 196–200 с d_0 = 35 мм, t = 7 мм на v = 2,5 м/мин с применением сульфофрезола: x–a = 1 мм, ε = 5 мм; o–a = 0,2 мм; ε = 2 мм; q – значения a и t пересчитаны на a = 0,2 мм и t_0 = 7 мм, ε = 2 мм.

скими соотношениями ($\beta = \frac{a}{2\sin\alpha}$), а максимальные контактные давления приложены именно на цилиндрической ленточке. В этом случае изменение ширины цилиндрической ленточки должно влиять на силу протягивания, что отражено в уравнениях (I), (6), (8), (9).

По мнению других, цилиндрическая ленточка (если она имеет целесообразную ширину) и обратный конус кольца в большинстве случаев не взаимодействуют с обрабатываемым металлом и не контактирукт с ним, что обусловливается внеконтактной деформацией детали. Некоторые авторы [9, 21, 22] представляют себе картину взаимодействия кольца с обрабатываемым металлом в процессе установившейся деформации в следующем виде (рис.32). Как перед движущимся кольцом, так и после него имеются зоны внеконтактной деформации (а, б). Перед кольцом зона "а" уменьшает ширину контакта на рабочем конусе кольца, после него зона "б" лишает контакта цилиндрическую ленточку и обратный конус. При наличии и достаточной величине волны внеконтактной деформации в зоне "б", обрабатываемый металл с цилиндрической ленточкой кольца контактирует в момент выхода ленточки из обрабатываемой втулки, когда уже зона "б" исчезла и выходное сечение втулки в силу упругой разгрузки при сходе его с кольца стало меньше диаметра цилиндрической ленточки. Однако в этом случае в результате концевого эффекта величина силы протягивания уменьшается и кратковременный контакт ленточки с обрабатываемой втулкой на ней не скажется. В тех случаях, когда обработанное отверстие получает диаметр, превышающий диаметр кольца (разбивка отверстия), контакт ленточки будет отсутствовать.

Для изучения взаимодействия кольца с обрабатываемой поверхностью были проведены специальные опыты. Кольцо пропускалось через втулку, на внутренней поверхности которой электролитическим способом был нанесен монослой мелкозернистых синтетических алмазов в виде кольцевого пояска, расположенного в среднем сечении по длине втулки. Когда алмазы во-

шли в контакт с поверхностью твердосплавного кольца, они на его полированной поверхности оставили четкий след, который показывает, что рабочий конус кольца взаимодействовал с поверхностью деформируемой втулки, цилиндрическая ленточка с ней не контактировала.

Величина волны внеконтактной деформации, как показали исследования, тем больше, чем больше натяг на кольцо и его диаметр, и тем меньше, чем больше толщина стенки обрабатываемой детали.

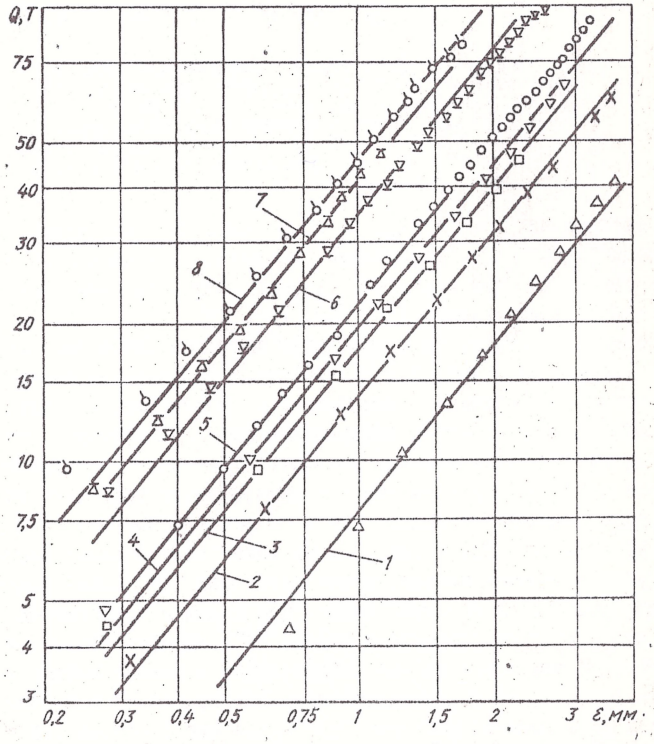

Рис. 29. Зависимость накопленной силы протягивания от пластической деформации при обработке втулок из стали У8 с d_0 = 35 мм, t = 7 мм на v = 2,5 м/мин с применением сульфофрезола при различной твердости материала втулок: 1 – НВ 180, a = 0,3 мм; 2 – НВ 285, a = 0,3 мм; 3 – a = НВ 365, a = 0,3 мм; 4 – НВ 393, a = 0,3 мм; 5 – НВ 210, a = = 0,1 мм; 6 – НВ 297; a = 0,1 мм; 7 – НВ 363, a = 0,1 мм; 8 – НВ 404, a = 0,1 мм.

С уменьшением натяга на кольцо, диаметра и с увеличением толщины стенки детали внеконтактная деформация в зоне "б" уменьшается, что может привести к контакту цилиндрической ленточки кольца с обрабатываемым металлом. Этот контакт нежелателен, так как он способствует схватыванию

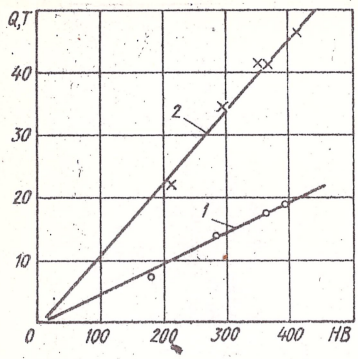

Рис. 30. Зависимость накопленной силы протягивания от твердости материала при обработке втулок из стали У8 с d_0=35 мм, t_0 = 7 мм на v= 2,5 м/мин с применением сульфофрезола при ε = I мм: I – α=0,3 мм, 2 – α=0,I мм.

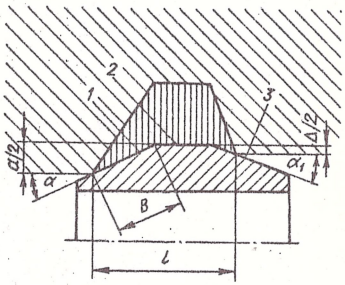

Рис. 3I. Картина контактного давления на деформирующем кольце по Ю.Г.Проскурякову.

металлов кольца и изделия. Поэтому ширину ленточки кольца следует делать тем меньше, чем меньше внеконтактная деформация, что отражено в табл. 4. В этом случае можно считать, что сила протягивания в заметной степени не зависит от ширины цилиндрической ленточки. Это было проверено экспериментально. В экспериментах при протягивании втулок из стали 20Х с диаметром отверстия 35,3 мм и толщиной стенки 7 мм, ширина ленточки на кольце изменялась от 0,5 до 5,0 мм. Протягивание производилось с двумя различными натягами на кольцо 0,05 и 0,43 мм и на двух скоростях 0,02 и 2,5 м/мин. Как следует из рис. 33, при протягивании на скорости 2,5 м/мин при малом натяге (0,05 мм) и при большом (0,43мм) изменение ширины ленточки не отразилось на силе протягивания. При очень малой скорости (0,02 м/мин) и малом натяге (0,05 мм) увеличение ширины ленточки вызвало некоторое возрастание силы протягивания, которое, однако, исчезает, если ширину ленточки ограничить рекомендованными в табл. 4 значениями. Кроме опытов, приведенных на рис. 33, были проведены опыты на втулках с толщинами стенок I0,I5 и 20 мм, на втулках с бесконечной толщиной стенки, на втулках из других металлов, в частности из алюминиевых сплавов АК6,Д16,В93 и из закаленных сталей 30ХГСА, 30ХГСНА, 40ХНМА. Опыты показали, что если ширина цилиндрической ленточки взята в соответствии с рекомендациями табл. 6, то ее влияние на силу протягивания отсутствует или совершенно не существенно.

Таблица 6

Состав смазки, вес. %	Технология приготовления смазки	Технология нанесения и сушки смазки	Область применения смазки
	АСМ-1		
Диановая эпоксидная смола ЭД-5-17(5-23) Жидкий полисульфидный каучук (4,8-5,2) Алифатическая эпоксидная смола на основе этиленгликоля (5,5-6,0) Метафенилендиамин (3,8-4,2) Порошкообразный MoS_2 (27-31) Органический растворитель (31,5-40,5)	Эпоксидную смолу ЭД-5 нагревают до 70-80°С, смешивают с жидким тиоколом и выдерживают в течение 1 ч при этой температуре. Затем в полученную смесь после охлаждения ее до комнатной температуры вводят алифатическую эпоксидную смолу и метафенилендиамин, растворенный в органическом растворителе в соотношении 1:1, и тщательно перемешивают. После этого в раствор вводят высушенный порошкообразный наполнитель зернистостью 1-5 мкм. Приготовленный состав помещают в металлический барабан со стальными шарами и связующее с наполнителем тщательно перетирают на шаровой мельнице в течение 2-3 ч. Полученную таким образом смазку доводят до необходимой вязкости смесью растворителей	Смазку наносят на обрабатываемую поверхность кистью, высушивают на воздухе при комнатной температуре в течение 1 ч и затем термообрабатывают при 160°С в течение 2 ч	Высоколегированные нержавеющие и жаропрочные стали и сплавы
	АСФ-3		
Пластифицированная нитроцеллюлозная смола (20-30). Органический растворитель (25-37) Порошкообразный фторопласт до 100%	В раствор нитроцеллюлозной смолы в смеси органических растворителей вводят высушенный порошкообразный наполнитель зернистостью 1-7 мкм. Приготовленный состав помещают в металлический барабан со стальными шарами и связующее с наполнителем тщательно перетирают на шаровой мельнице в течение 1,5-2 ч. Полученную таким образом смазку доводят до необходимой вязкости смесью растворителей	Хорошо размешанную смазку наносят кистью на обрабатываемую поверхность. Высушивают на воздухе при комнатной температуре в течение 10 мин	Стали 30ХГСНА, HRC 45-50; ЭИ643, HRC 48-53,5; 40ХНМА, HRC до 50; 30ХГСА, HRC до 50 и др. и сплавы АК6, НВ 100; Д16, НВ 120

	АСМ-4		
Полифенилсилоксановая смола (25-30) Диэтиленгликоль-*N,N*-толуилендиуретан (5-10) Дисульфид молибдена (30-40). Органический растворитель до 100%	Компоненты смешивают при комнатной температуре	Хорошо размешанную смазку наносят кистью на обрабатываемую поверхность. Высушивают при комнатной температуре в течение суток	Толстостенные заготовки из горячекатаной трубы из стали 40Х, ванадия, ниобия
	АСМ-5		
Эфир целлюлозы, например, ацетилцеллюлоза или оксиэтилцианэтилцеллюлоза (3-5) Толуилендиизоцианат (0,05-0,1) Дисульфид молибдена (30-35) Органический растворитель (например, хлористый метилен, ацетон)	Готовят 4-5%-ный раствор ацетилцеллюлозы в хлористом метилене или оксиэтилцеллюлозы в ацетоне. Растворение происходит в течение нескольких суток. Затем при размешивании добавляют MoS_2 в соотношении 2:1 и толуилендиизоцианат	Хорошо размешанную смазку наносят кистью на обрабатываемую поверхность. Высушивают при комнатной температуре 5-10 мин	Толстостенные заготовки из горячекатаной трубы из стали 40Х, ванадия, ниобия
	АСМ-6		
Лак Ф-9-К (30-40) Дисульфид молибдена (30-35) Толуол до 100%	50-60%-ный раствор лака в толуоле при комнатной температуре смешивают с дисульфидом молибдена в соотношении 2:1	Хорошо размешанную смазку наносят на обрабатываемую поверхность. Высушивают смазку при комнатной температуре в течение суток	Ниобий, ванадий, толстостенные заготовки из горячекатаных, труб из нержавеющих, жаропрочных и углеродистых сталей

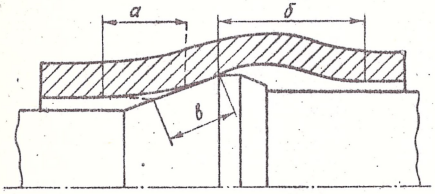

Рис. 32. Взаимодействие деформирующего кольца с обрабатываемой поверхностью.

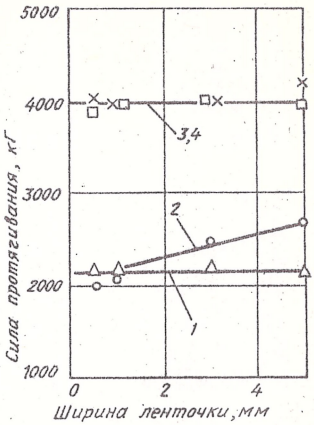

Рис.33. Зависимость силы протягивания от ширины цилиндрической ленточки кольца при протягивании втулок из стали 20Х, HB146 с d_0=35,3 мм, t_0=7 мм, ε=0,9 мм с применением сульфофрезола: I – v=2,5 м/мин, a=0,05 мм; 2 – v=0,02 м/мин, a=0,05 мм; 3(□) – v=2,5 м/мин, a=0,43 мм; 4(×) – v=0,02 м/мин, a=0,43 мм.

Результаты исследования влияния угла рабочего конуса кольца были приведены на рис. I2. Из этого рисунка видно, что существует оптимальный угол $2\alpha = 8^0$, который соответствует минимальной силе протягивания. Отклонение от него влечет за собой увеличение силы протягивания тем более существенное, чем больше натяг на кольцо, величина пластической деформации и толщина стенки детали. При малых натягах на кольцо и толщине стенок угол рабочего конуса кольца не влияет на силу протягивания. Влияние угла рабочего конуса кольца от $2\alpha = 4^0$ до $2\alpha = 15\text{–}20^0$ во всех случаях малосущественно. Учитывая, что целесообразно использовать именно эти значения углов, нет смысла в эмпирическую зависимость для расчета силы протягивания вводить влияние углов, так как это значительно усложнило бы зависимость.

Сила протягивания в значительной степени зависит от смазки. Без применения смазки осуществлять деформирующее протягивание нельзя, так как в результате больших контактных напряжений обязательно возникает схватывание обрабатываемого металла с кольцом в зоне контакта. Роль смазки особенно возрастает при протягивании деталей из нержавеющих, жаропрочных, высоколегированных сталей и сплавов, которые склонны к осо-

бенно интенсивному схватыванию. Для предотвращения схватывания при обработке этих металлов требуются особые смазки, так как обычные смазки здесь себя не оправдывают.

Переходом с одной смазки на другую можно очень значительно изменить силу протягивания. Так, при обработке заготовки из горячекатанной трубы размером I46x20 мм из стали 40Х кольцами с номинальным натягом I,5 мм с суммарной деформацией $\mathcal{E}$=I2,5 мм и применении в качестве смазки сульфофрезола с дробеструйной очисткой поверхности отверстия перед протягиванием, сила на последнем кольце будет около 50 Т. Если же применить твердую смазку (лак Ф-9-К с дисульфидом молибдена), то при тех же условиях сила протягивания снизится до 37 Т, т.е. на 26%. Так можно значительно облегчить работу протяжного станка.

Наиболее важным качеством технологической смазки является ее экранирующее свойство, т.е. способность так разделять трущиеся в процессе относительного перемещения поверхности, чтобы при высоких контактных давлениях не возникали их непосредственные контакты, что обычно приводит к схватыванию. В Институте сверхтвердых материалов АН УССР разработан специальный метод определения экранирующих свойств технологических смазок [23 24]. Наиболее высокими экранирующими свойствами обладают твердые смазки [25], составы которых, технология нанесения и сушки приведены в табл. 6. К этим смазкам следует прибегать в тех случаях, когда в процессе возникают высокие контактные давления или обрабатываются такие металлы, которые склонны к интенсивному схватыванию.

Нами не проводились специальные исследования, которые показали бы влияние различных смазок на силу протягивания и позволили бы ввести в уравнения (I6)-(I8) сомножители, учитывающие это влияние. В табл. 5, где приведены значения всех коэффициентов и показателей степени, входящих в уравнения (I6) – (I8), указаны те смазки, с использованием которых процесс деформирующего протягивания надежно осуществляется.

Учет концевого эффекта и числа колец, одновременно находящихся в контакте с изделием, при расчете силы протягивания

При протягивании отверстий в деталях с конечной толщиной стенки при K_i = I уравнение (I6) позволяет рассчитать силу протягивания на кольце, находящемся в детали в зоне установившейся нагрузки. При работе протяжки может оказаться одновременно несколько нагруженных колец, причем крайние из них могут располагаться вне зоны установившейся нагрузки. Эти условия учитываются сомножителем K_i в уравнении (I6). В отличие от режущих протяжек, зубцы которых получают полную нагрузку в момент вступления в обрабатываемое отверстие и почти мгновенно теряют ее в момент выхода из него, кольцо деформирующей протяжки накапливает и теряет нагрузку на протяжении довольно значительного пути входа в отверстие $L_{вх}$ и выхода из него $L_{вых}$. Процесс изменения нагрузки (осевой силы) на одном

кольце при проходе его через обрабатываемое отверстие в детали схематически представлен на рис. 34. Здесь показана втулка с отверстием длиной $L_{отв}$ и различные положения одного и того же деформирующего кольца. Под втулкой внизу показан схематизированный график нагрузки на кольце. Сила на кольце возрастает от нуля до максимума на пути $L_{вх}$ и падает от максимума до нуля на пути $L_{вых}$, причем длина графика нагрузки больше длины отверстия на величину $\frac{a}{2tg\alpha}+b$, где b – ширина цилиндрической ленточки на кольце. В результате специально проведенных экспериментов, в которых на ленте осциллографа одновременно фиксировались нагрузка на кольце и пройденный путь, были получены для $\alpha=4^0$ зависимости

$$L_{вых}=1,37\,t^{0,7}\,d^{0,22}, \qquad (21)$$

$$L_{вх}=L_{вых}+\frac{a}{2tg\alpha}; \qquad (22)$$

$L_{вых}$ незначительно зависит также от натяга на кольцо, чем можно пренебречь.

С точки зрения наименьшего колебания суммарной нагрузки на многокольцевой протяжке шаг между кольцами S выгодно брать таким, чтобы постепенно спадающая нагрузка на выходящем из отверстия кольце компенсировалась возрастающей нагрузкой на очередном входящем кольце. На рис. 34 показан такой оптимальный шаг $S_{опт}$, причем принято, что изменение нагрузки при входе и выходе протекает по наклонным прямым. Нетрудно заметить, что оптимальный шаг

$$S_{опт}=\frac{L_{отв}-L_{вых}+\frac{a}{4tg\alpha}+b}{Z_S}, \qquad (23)$$

где Z_S – любое целое число, показывающее число целых шагов, укладывающихся между крайними кольцами (входящими и выходящими). Здесь принято, что на отрезках $L_{вх}$ и $L_{вых}$ может поместиться только по одному кольцу, что обычно и наблюдается.

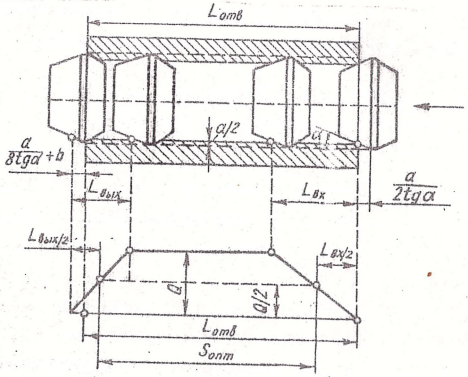

Рис. 34. Изменение нагрузки (осевой силы) на одном кольце при проходе его через обрабатываемое отверстие в длинной детали.

При расчете K_i могут встретиться два случая, которые рассмотрим ниже.

I случай: $$L_{отб} < L_{вх} + L_{вых} - \frac{a}{2tg\alpha} - b. \qquad (24)$$

В этом случае ни на одном из колец протяжки, находящихся одновременно в обрабатываемом отверстии, нагрузка не будет максимальной, так как кольцом еще не будет пройден весь путь накопления нагрузки $L_{вх}$, а уже начнется период выхода и спада нагрузки. На рис.35 схематически представлена длина отверстия $L_{отб}$ и расположение колец, отстоящих друг от друга на величину шага S и занимающих такое положение, при котором суммарная нагрузка максимальна. Здесь же построен график нагрузки на кольце по мере прохода через отверстие и показано положение четырех колец (I–IУ). Пунктиром показан график нагрузки для длины $L_{отб} = L_{вх} + L_{вых} - \frac{a}{2tg\alpha} - b$ при которой нагрузка на одном из колец достигла бы максимума. Из рис.35 следует:

$$h_3 = h_{макс}\frac{l_{вх}}{L_{вх}},$$

$$h_2 = h_{макс}\frac{l_{вх} - S}{L_{вх}},$$

$$h_1 = h_{макс}\frac{l_{вх} - 2S}{L_{вх}},$$

$$h_4 = h_{макс}\frac{l_{вых} - S}{L_{вых}}.$$

Максимальная нагрузка на кольце обозначена на графике h_{max} для этой нагрузки $K_i = I$. Поэтому будем считать $h_{макс} = I$.

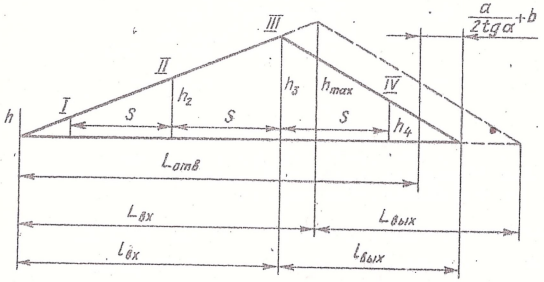

Рис. 35. Изменение нагрузки на кольце при обработке отверстия в короткой детали, когда отсутствует участок установившейся нагрузки.

Эта нагрузка на кольце могла бы быть в том случае, если бы длина отверстия имела значение

$$L_{отб} \geqslant L_{вх} + L_{вых} - \frac{a}{2tg\alpha} - b.$$

Отсюда

$$l_{вх} = L_{вх}\frac{L_{отб} + \frac{a}{2tg\alpha} + b}{L_{вх} + L_{вых}} = L_{вх}\,B; \qquad (25)$$

$$l_{вых} = L_{вых}\frac{L_{отв} + \frac{a}{2tg\alpha} + b}{L_{вых} + L_{вх}} = L_{вых}\,B. \qquad (26)$$

Суммируя эти нагрузки, на одновременно находящихся в работе кольцах, выраженные в долях максимально возможной нагрузки на кольце ($h_{макс}$=I), получаем тот сомножитель, на который нужно умножить максимальную нагрузку на протяжке

$$K_i = h_1 + h_2 + h_3 + h_4. \qquad (27)$$

Эту сумму всегда можно представить в следующем виде:

$$K_i = B + \sum_{1}^{p}\frac{BL_{вх} - PS}{L_{вх}} + \sum_{1}^{q}\frac{BL_{вых} - qS}{L_{вых}}. \qquad (28)$$

Здесь p –число колец, размещенных на длине входа $l_{вх}$; q – то же на длине выхода $l_{вых}$

$$B = \frac{L_{отв} + \frac{a}{2tg\alpha} + b}{L_{вх} + L_{вых}}. \qquad (29)$$

При расчете K_i величинам p и q последовательно нужно давать значения I,2,3 и т.д., пока дроби под знаками суммы не станут получать отрицательный знак.

Для разбираемого случая $B < I$.

II случай: $$L_{отв} \geqslant L_{вх} + L_{вых} - \frac{a}{2tg\alpha} - b. \qquad (30)$$

Этот случай схематически представлен на рис. 36.

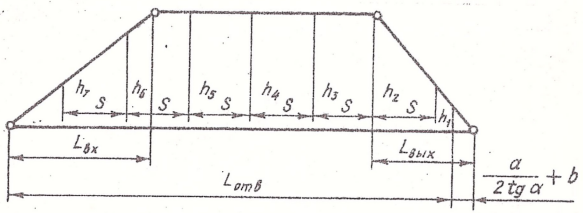

Рис. 36. Изменение нагрузки на кольцах при обработке отверстия в длинной детали, когда имеется участок установившейся нагрузки.

В этом случае ряд колец расположен между отрезками входа $L_{вх}$ и выхода $L_{вых}$ и они несут на себе максимальную нагрузку. Число этих колец, а следовательно, и число максимальных нагрузок

$$N = \frac{L_{отв} + \frac{a}{2tg\alpha} + b - L_{вх} - L_{вых}}{S}. \qquad (31)$$

Это значение N следует округлить до ближайшего большего целого числа, если же оно получит при расчете по (31) значение целого числа, то к нему нужно прибавить единицу.

$$h_2 = h_3 = h_4 = h_5 = h_{макс},$$

$$h_1 = h_{макс}\frac{L_{вых} - S}{L_{вых}},$$

$$h_6 = h_{макс}\frac{L_{отв}+\frac{a}{2tg\alpha}+b-L_{вых}-NS}{L_{вх}},$$

$$h_7 = h_{макс}\frac{L_{отв}+\frac{a}{2tg\alpha}+b-L_{вых}-(N+1)S}{L_{вх}}.$$

Принимая $h_{макс}=1$, получаем общее уравнение

$$K_i = N+\sum_1^p\frac{L_{вых}-pS}{L_{вых}}+\sum_0^q\frac{L_{отв}+\frac{a}{2tg\alpha}+b-L_{вых}-(N+q)S}{L_{вх}}. \qquad (32)$$

В уравнении (32) вместо p следует подставлять 1,2,3 и т.д., пока во втором члене дробь под знаком суммы не получит отрицательного знака, q следует брать 0,1,2,3 и т.д., пока числитель под знаком суммы в третьем члене не получит отрицательного знака. $L_{вх}$ и $L_{вых}$ в зависимости от толщины стенки, диаметра отверстия, натяга на кольцо определяются по уравнениям (21), (22).

Уравнение (16) пригодно для случая, когда все кольца протяжки работают с одинаковыми натягами. Однако иногда целесообразно иметь разные натяги на разных кольцах одной протяжки. Для этого случая формула для

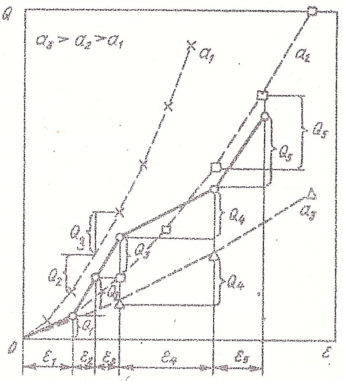

Рис.37. Зависимость суммарной силы протягивания от пластической деформации при различных натягах на кольцах протяжки.

расчета силы на одном кольце будет

$$Q = C\frac{t_0^{\pi}\, d_0^{\gamma}\, HB}{d_n^{r}}\, M\left[\left(\sum_1^n\varepsilon\right)^m-\left(\sum_1^{n-1}\varepsilon\right)^m\right]. \qquad (33)$$

Здесь M – сомножитель, учитывающий положение кольца в отверстии; a_n – натяг на том кольце, для которого производится расчет силы, независимо от того, каковы натяги на предыдущих кольцах.

Правомерность этого следует из рассмотрения рис. 37. В координатах ε (деформация) – Q (сила) нанесены штриховыми линиями кривые силы для трех различных натягов на кольцо a_1, a_2, a_3. Кроме этого, сплошными линиями показано накопление силы на протяжке с различными натягами на кольцах: на первом a_2, на втором и третьем по a_1, на четвертом a_3 и на пятом a_2. Соответственно на кольцах будут силы Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5. Предположим, что нас интересует сила на четвертом кольце (Q_4). Она, безусловно, будет такой же, как и на протяжке, работающей с одинаковы-

ми на всех кольцах натягами a_3, при условии создания той же суммарной пластической деформации($\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4$). Поэтому силу a_4 можно получить как действующую на кольце протяжки, работающей с одинаковыми натягами a_3, чему и соответствует уравнение (33).

При разных натягах на кольцах протяжки суммарную силу на одновременно находящихся в работе кольцах нельзя получить умножением на K_i. Она определяется суммированием сил на отдельных кольцах.

При определении суммарной силы на протяжке, работающей с разными натягами на кольцах, суммируя силы на отдельных кольцах, учитываем число колец, одновременно находящихся в обрабатываемом отверстии, натяг на каждом из них и зону отверстия (зоны входа, установившейся нагрузки, выхода), в которой находится каждое кольцо. Последнее учитывается в уравнении (33) сомножителем M, величина которого зависит от положения кольца в отверстии и численно выражает долю от максимальной нагрузки, приходящуюся на кольцо при данном его положении. В зоне установившейся нагрузки $M=1$, зонах выхода и входа $M<1$. Определяется M следующим образом.

При

$$L_{отб} < L_{вх} + L_{вых} - \frac{a}{2tg\alpha} - b \qquad M<1.$$

Для кольца, находящегося на границе между $l_{вх}$ и $l_{вых}$ (см.рис.35),

$$M = B = \frac{L_{отб} + \frac{a}{2tg\alpha} + b}{L_{вх} + L_{вых}}. \qquad (34)$$

Для каждого из впереди расположенных в зоне выхода колец

$$M = \frac{BL_{вых} - qS}{L_{вых}}. \qquad (35)$$

Для каждого из колец, находящихся в зоне входа,

$$M = \frac{BL_{вх} - pS}{L_{вх}}. \qquad (36)$$

Здесь q и p – порядковые номера колец (1, 2, 3...), если считать нулевым кольцо на границе зон входа и выхода.

При

$$L_{отб} \geq L_{вх} + L_{вых} - \frac{a}{2tg\alpha} - b \qquad M \leq 1.$$

Для колец, помещенных в зоне установившейся нагрузки между зонами входа и выхода (см. рис. 36) $M=1$.

В зоне выхода

$$M = \frac{L_{вых} - pS}{L_{вых}}. \qquad (37)$$

Здесь p – порядковый номер кольца, если считать нулевым кольцо на границе зон входа и установившейся нагрузки.

В зоне входа

$$M = \frac{L_{отб} + \frac{a}{2tg\alpha} + b - L_{вых} - (N+q-1)S}{L_{вх}}. \qquad (38)$$

Здесь q – порядковый номер кольца в зоне выхода, считая от зоны установившейся нагрузки.

Покажем на примере, как пользоваться полученными зависимостями. Предположим, необходимо рассчитать силу протягивания для следующих условий:

Протягивается втулка из стали 45 НВ280 с исходными размерами: d_0 = 75 мм, t_0 = 10 мм, $L_{отв}$ = 60 мм. Натяг на кольцо I мм, суммарная деформация 6 мм. Угол рабочего конуса кольца $\alpha = 4^0$, ширина цилиндрической ленточки b = I мм, шаг между кольцами протяжки S = I5 мм:

$$L_{вых} = 1{,}37 \cdot 10^{0{,}7} \cdot 75^{0{,}22} = 17{,}8 \text{ мм},$$

$$L_{вх} = 17{,}8 + \frac{1}{2 tg 4^0} = 24{,}95 \text{ мм},$$

$$L_{вх} + L_{вых} - \frac{a}{2 tg 4^0} - b = 34{,}9 \text{ мм}.$$

Таким образом, здесь второй случай, когда

$$L_{отв} > L_{вх} + L_{вых} - \frac{a}{2 tg \alpha} - b.$$

Для него по формуле (3I)

$$N = \frac{60 + 7{,}15 + 1 - 17{,}8 - 24{,}95}{15} = 1{,}68.$$

Округляя до ближайшего большего целого числа, имеем N=2,

$$K_i = 2 + \sum_{1}^{p} \frac{17{,}8 - p\,15}{17{,}8} + \sum_{1}^{q} \frac{60 + 7{,}15 + 1 - 17{,}8 - (2+q)15}{24{,}95}.$$

Второй член в уравнении при подстановке p = I имеет положительный знак и должен быть учтен, при подстановке p = 2 получает отрицательный знак и не учитывается. Третий член будет иметь положительные значения при q = 0 и q = I. Поэтому

$$K_i = 2 + 0{,}157 + 0{,}816 + 0{,}214 = 3{,}19.$$

В данном случае одновременно в детали будет находиться пять колец протяжки. На двух будет полная нагрузка. Обращаясь к формуле (I6) и подставляя в нее соответствующие значения, получаем.

$$Q = 0{,}51 \frac{10^{1{,}32} \cdot 75^{0{,}37} \cdot 280}{1^{0{,}76}} 3{,}19 \left[6^{1{,}22} - 5^{1{,}22} \right] = 64623 \text{ кг}.$$

Если при расчете не учитывать изменение силы протягивания на входе и выходе, то расчетная сила была бы Q = I0I,3 Т, что на 56,8% выше действительной.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕКОНТАКТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЕТАЛИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ СИЛЫ ПРОТЯГИВАНИЯ

На рис. 32 показана схема взаимодействия деформирующего кольца с обрабатываемой деталью при наличии внеконтактной деформации. Как показали проведенные исследования, внеконтактная деформация наблюдается всегда при протягивании деталей с конечной толщиной стенки, причем ее величина в зоне "б" тем больше, чем больше натяг на кольцо, диаметр отверстия и чем меньше толщина стенки детали.

Схема взаимодействия кольца с обрабатываемым металлом (см. рис.32) позволяет предположить, что работа, затрачиваемая на процесс деформи-

рующего протягивания, складывается из работ, затрачиваемых на основную деформацию увеличения диаметра, внеконтактную деформацию, на преодоления сил трения и на изгиб слоев металла при входе на рабочий конус кольца и при сходе с него.

Если в обрабатываемом отверстии одновременно находится несколько колец и они расположены друг от друга на расстояниях, превышающих длину волны внеконтактной деформации в зоне "b" (рис. 38) то каждое из них производит полностью все составные части работы. В этом случае каждое из колец находится в таких условиях взаимодействия с обрабатываемой деталью (ширина контакта, контактные давления, коэффициент трения и др.), как если бы через отверстие пропускалось одно кольцо. Если же деформирующие кольца расположить так, что каждое последующее будет находиться в зоне внеконтактной деформации детали (рис. 39), образо-

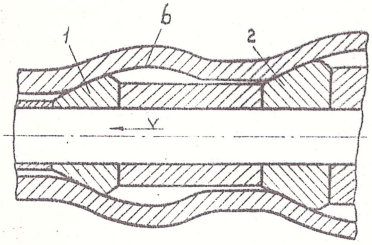

Рис.38. Протягивание отверстия деформирующей протяжкой, каждое кольцо которой расположено вне зоны внеконтактной деформации от предыдущего.

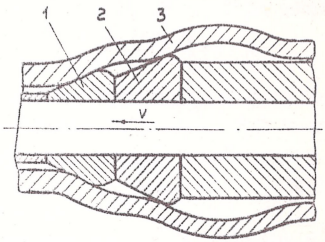

Рис.39. Протягивание отверстия деформирующей протяжкой, когда второе кольцо расположено в зоне внеконтактной деформации от предыдущего.

ванной предыдущим, то в этом случае, как нами обнаружено, условия взаимодействия их с раздаваемой заготовкой меняются, что приводит к значительному снижению рабочих нагрузок на отдельных кольцах, одновременно находящихся в зоне деформации, и уменьшению (до двух и более раз) суммарной силы и работы, необходимых для осуществления заданной величины пластической деформации.

Суммарная сила и работа значительно снижаются при неизменно действующих факторах процесса деформирования – геометрических параметрах и размерах инструмента (деформирующих колец), скорости протягивания, применяемой смазке, величине деформации, создаваемой как каждым отдельным деформирующим кольцом, так и суммарной, числе ступеней деформации. Это явление связано с изменением физико-механических условий взаимодействия инструмента с изделием в зоне их контакта. Проведенные наблюдения

дают основания полагать, что уменьшение силы и работы связано с уменьшением ширины контакта как на каждом из колец, так и суммарной (что способствует лучшему проникновению смазки в зону контакта), с изменением контактных давлений, уменьшением коэффициента трения и работы трения, уменьшением работы, затрачиваемой на изгиб слоев материала, проходящих через зону деформации, уменьшением работы упругой деформации в связи с тем, что нет полной разгрузки материала после прохождения зоны деформации каждым из колец, кроме последнего.

Для оценки величины снижения силы протягивания использованием эффекта внеконтактной деформации были проведены специальные опыты с деталями, изготовленными из пяти металлов, – сталей 20, 45, 40Х, 38ХМЮА и алюминиевого сплава АК6. Опыты по раздаче заготовок из сплава АК6 проводились на горизонтально-протяжном станке модели 7Б520 со скоростью протягивания 5 м/мин. Стальные детали прошивались на 200-тонном прессе ПММ-20 со скоростью 0,025 м/мин. Применялось три различных состава смазки: жидкая – сульфофрезол и твердые – лак Ф-9-К с дисульфидом молибдена и полимерная основа с дисульфидом молибдена. При использовании жидкой смазки поверхность детали и твердосплавных колец обильно смазывались ею. В случае применения твердых смазок их наносили предварительно на обрабатываемую поверхность детали, высушивали на воздухе, после чего производился процесс деформирования с последовательным пропусканием деформирующих элементов без возобновления слоя смазки.

В табл. 7 приведены результаты этих экспериментов. Во всех случаях (пять различных металлов, пять разных диаметров и толщин стенок, различные деформации, три различных смазки, две скорости деформирования, различная подготовка внутренней поверхности заготовки) расположение деформирующих элементов такое, что каждый последующий находится в зоне внеконтактной деформации детали от предыдущего, снижает силу на инструменте на 30–52%. Скорость протягивания изменялась от 0,025 до 5 м/мин, т.е. в 200 раз, однако во всех случаях эффект внеконтактной деформации был ярко выражен. Различные методы подготовки обрабатываемой поверхности и применение различных технологических смазок также не уничтожили эффекта внеконтактной деформации.

Следует отметить, что особенно перспективно использование совместного влияния смазки и эффекта внеконтактной деформации (табл. 7, последние две строки для случаев обработки стали 40Х заготовка I46х20). В случае применения для смазки сульфофрезола и без использования эффекта внеконтактной деформации сила, необходимая для деформирования, была I50 Т, переход на твердую смазку Ф-9-К с дисульфидом молибдена и использование эффекта внеконтактной деформации снизили ее до 70 Т, т.е. на 53,3%, что не является пределом, так как есть более эффективные смазки.

Возможность значительно снизить силу и работу при обработке деталей методами пластического деформирования имеет большое практическое значение, так как позволяет повысить производительность технологических

Таблица 7

Материал обрабатываемой детали, ее размеры (диаметр отверстия, толщина стенки), мм	Внутренняя поверхность заготовки	Смазка	Скорость протягивания, м/мин	Число деформирующих колец, одновременно находящихся в работе	Величина деформации, осуществляемой одним кольцом	Суммарная деформация, мм	Сила протягивания (Т) при расположении деформирующих элементов		
							вне зоны внеконтактной деформации	в зоне внеконтактной деформации от предыдущих	снижение силы протягивания, %
Сплав АК6, 66х19	Расточена резцом	Сульфофрезол	5,0	2 3 4 5	I,0	2,0 3,0 4,0 5,0	I6,7 26,8 37,6 47,6	II,7 I4,I I9,7 24,I	30,0 47,3 47,6 49,4
Сталь 38ХМЮА, I08, 5х2I	Черная	Полимерная основа с MoS_2	0,025	2	I,5	3,0	80,2	46,5	42,0
Сталь 20, 88х20	Расточена резцом	Сульфофрезол	0,025	2 4	2,0	4,0 8,0	46,2 II0,2	26,9 53,0	4I,9 5I,9
Сталь 45, I4I,5х27,2	Расточена резцом	Сульфофрезол	0,025	2	I,5	3,0	II2,5	67,0	40,4
Сталь 40Х I06х20	Черная	Ф-9-К с MoS_2	0,025	3	I,5	4,5	II0,0	70,0	45,4
Сталь 40Х, I06х20	Обработана дробью	Сульфофрезол	0,025	3	I,5	4,5	I50	90	40

процессов, которая обычно лимитируется прочностными характеристиками инструмента и мощностью оборудования. Так, широко применяемые в машиностроительном производстве протяжные станки, на которых осуществляется деформирующее протягивание, выпускаемые серийно станкостроительными заводами, имеют максимальную силу протягивания 40 Т. Это ограничивает размеры изделий, которые могут обрабатываться деформирующими протяжками и в большинстве случаев заставляет обрабатывать детали за несколько проходов, выполняя при каждом проходе не всю необходимую величину деформации, а лишь часть ее, допустимую силой тяги станка. Это соответственно снижает производительность операции и удорожает ее.

Обнаруженное нами явление значительного уменьшения суммарной силы при соответствующем расположении деформирующих элементов позволяет использовать протяжной станок, как якобы имеющий в 1,5–2 раза большую силу тяги (см. табл. 7). Это приведет к уменьшению числа необходимых проходов при обработке детали, повышению производительности, укорочению и удешевлению инструмента и к снижению себестоимости обработки детали.

Кроме того, значительно разгружается инструмент (деформирующая протяжка), рабочие элементы которого, изготовляемые обычно из металлокерамических твердых сплавов, будут более высокостойкими и из условия их прочности могут быть изготовлены меньших размеров, что приведет к экономии сплава.

Эффект внеконтактной деформации успешно использовался при разработке новых технологических процессов обработки отверстий деталей твердосплавными деформирующими протяжками. Одним из примеров является обработка отверстий диаметром 120 мм в детали 700.23.00.062 трактора К-700 Ленинградского Кировского завода. В этом случае только использование эффекта внеконтактной деформации позволило производить операцию на 80-тонном протяжном станке.

В табл. 7 даны результаты опытов с натягами на кольцо от 1 до 2 мм. Кроме того, были проведены специальные опыты, которые показали, что при меньших натягах и уменьшение силы будет менее значительным, однако уже при натяге на кольцо 0,2 мм с использованием внеконтактной деформации сила протягивания заметно снижается. Мы еще не располагаем данными, которые позволили бы рассчитать величину снижения силы протягивания в зависимости от обрабатываемого металла, натяга на кольцо, числа колец в группе, расстояния между кольцами в группе и от других факторов. Но во всех случаях, когда необходимо снизить силу протягивания, следует прибегать к использованию внеконтактной деформации, причем для этого достаточно кольца симметрично-нагруженной формы и оптимальной высоты расположить в группе одно за другим без промежуточных втулок.

ЛИТЕРАТУРА

I. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Обработка отверстий выглаживающими протяжками. К., "Техніка", 1966.

2. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Краткая методика расчета и проектирования твердосплавных выглаживающих протяжек. К., Изд. УкрНИИСМИ, 1966.

3. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Расчет и проектирование твердосплавных выглаживающих протяжек. М., Изд. ГОСИНТИ,№ 6-67(-393)II3,1967.

4. Розенберг А.М. и др. Твердосплавные протяжки для обработки отверстий методом пластического деформирования. К., Изд. УкрНИИНТИ,1968.

5. Розенберг А.М. и др. Прочность твердосплавных рабочих элементов деформирующих протяжек. К., "Техніка", 1971.

6. Альшевский Л.Е. Тяговые усилия при холодном волочении труб. М., Металлургиздат, 1952.

7. Перлин И.Л. К расчету тяговых усилий при волочении. - В кн.: Обработка металлов давлением. Под ред. И.П.Громова. М., Металлургиздат, 1952.

8. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М., "Металлургия", 1971.

9. Попов Е.А. - В кн.: Основы теории обработки металлов давлением. Под ред. Н.В.Сторожева. М., Машгиз, 1959.

10. Казакевич И.И. Определение усилий при обжиме и раздаче труб. - В кн.: Метод раздачи труб горячим волочением, обмен передовым опытом. Изд. ЦБНТИ тяжелого машиностроения, М., 1958.

11. Колмогоров В.Л. - В кн.: Теория обработки металлов давлением, гл.XXIII. Под ред. И.Я.Тарновского. М., Металлургиздат, 1963.

12. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. Москва-Свердловск, Машгиз, 1961.

13. Стрижак В.И. Исследование процесса холодной раздачи труб. Автореф. канд. дис., Днепропетровск, 1963.

14. Авицур. Обжим и раздача труб. Конструирование и технология машиностроения. - В кн.: Тр. амер. об-ва инженеров-механиков, 1965,№ I.

15. Шельвинский Г.И. Тяговое усилие и оптимальная геометрия инструмента при дорновании отверстий с большими натягами. - В кн.: Упрочняюще-калибрующие методы обработки деталей, Изд. РИСХМ, Ростов н/Д,1970.

16. Розенберг А.М. и др. Динамометр для измерения сил протягивания.- Технология и организация производства, 1966,№ 5.

17. Монченко В.П. Исследование и внедрение процесса дорнования отверстий с большими натягами в деталях типа втулок и гильз. Автореф.канд. дис. Ростов н/Д, 1967.

18. Монченко В.П. Обработка отверстий дорнованием с большими натягами в деталях типа втулок и заготовок. - В кн.: Размерно-чистовая обработка деталей машин пластическим деформированием взамен обработки резанием. М., Изд. НИИМАШ, 1965.

19. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел, М., ИЛ, 1954.

20. Проскуряков Ю.Г., Шельвинский Г.И. Контактные давления при дорновании отверстий с большими натягами. - В кн.: Исследование технологических процессов упрочняюще-калибрующей и деформирующей обработки металлов, Ростов н/Д, Изд. РИСХМ, 1970.

21. Чепурко М.И. Внеконтактная деформация при производстве труб и ее влияние на сопротивление деформации. - Бюл. научно-техн. информации, № 4-5, М., Металлургиздат, 1958.

22. Розенберг А.М. и др. Эффект внеконтактной деформации. - В кн.: Синтетические алмазы, в. 3(27). К., "Наукова думка", 1973.

23. Авт. свид. № 298863. - Бюл. изобр., 1971, № 11.

24. Розенберг А.М. и др. Новая комплексная методика испытания технологических смазок для обработки металлов давлением. - В кн.: Технологические смазки, в.II. К., Изд. УкрНИИНТИ, 1971.

25. Авт. свид. № 273357. - Бюл. изобр., 1970, № 20.

26. Авт. свид. № 301235. - Бюл. изобр., 1971, № 14.

27. Пономарев С.Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. т.II. М., Машгиз, 1958.

28. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию, М.-Л., Машгиз, 1961.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ 3
ОБОРУДОВАНИЕ, АППАРАТУРА, ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА 7
Методика проведения экспериментов 9
Динамометр с индуктивными датчиками для измерения силы протягивания II
Тензометрический динамометр для измерения силы протягивания I2
Тензометрический динамометр для измерения сил при прошивании .. I3
Устройство для измерения пути перемещения рабочей каретки протяжного станка и скорости протягивания I6
ТОЧНОСТЬ УРАВНЕНИЙ, ПРЕДЛОЖЕННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА СИЛЫ ПРОТЯГИВАНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ АВТОРАМИ I8
ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА СИЛЫ ПРОТЯГИВАНИЯ 2I
Влияние толщины стенки детали на силу протягивания 22
Влияние натяга на кольцо, суммарного натяга и диаметра отверстия на силу протягивания при бесконечной толщине стенки 25
Влияние основных факторов процесса на силу протягивания отверстий в деталях с конечной толщиной стенки 28
Учет концевого эффекта и числа колец, одновременно находящихся в контакте с изделием, при расчете силы протягивания 43
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕКОНТАКТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЕТАЛИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ СИЛЫ ПРОТЯГИВАНИЯ 49
ЛИТЕРАТУРА 54

Александр Минеевич Розенберг, Олег Александрович Розенберг,
Анатолий Дмитриевич Крицкий, Юрий Федорович Бусел

РАСЧЕТ СИЛЫ ПРОТЯГИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ТВЕРДОСПЛАВНОЙ ДЕФОРМИРУЮЩЕЙ ПРОТЯЖКОЙ

(Научно-техническая информация)

Печатается по постановлению ученого совета
Института сверхтвердых материалов АН УССР

Редактор Л.Д.Прокопенко
Художественный редактор Н.И.Возный
Технический редактор Т.М.Зубрицкая
Корректор В.С.Якубенко

Подписано к печати 4.УП 1975 г. БФ 02083. Бумага офс. № 2, 60x84 1/16.
Усл.печ.листов 3,25. Уч.-изд.листов 3,57. Тираж 1000. Зак. № 5-485
Изд. № 132И. Цена 23 коп.

Издательство "Наукова думка", Киев, Репина, 3.
Киевская типография научной книги республиканского производственного
объединения "Полиграфкнига" Госкомиздата УССР,
Киев, Репина, 4.

23 коп.